



# **Magnetische Charakterisierung der Böden in der antiken Bergbauregion Ferrum Noricum (Raum Knappenberg/Kärnten)**

Masterarbeit von Alexandra Lafner

Betreuung  
Dr. Robert Scholger  
Lehrstuhl für Geophysik, Montanuniversität Leoben

Ich versichere an Eides statt, die vorliegende Arbeit  
selbständig unter Verwendung der angegebenen  
Literatur durchgeführt zu haben.

Alexandra Lafner

Leoben, Februar 2009

## **Danksagung**

Ich bedanke mich bei Herrn Dr. Robert Scholger, Institut für Geophysik, Montanuniversität Leoben, für die Idee und den Auftrag zu dieser Diplomarbeit sowie für die hervorragende Betreuung und Korrektur dieser Arbeit.

Ein großes Dankeschön gilt meiner Familie, die mir während meiner Ausbildung viel Kraft geschenkt hat. Ihrer Unterstützung ist es zu verdanken, dass ich diesen Weg ohne größere Hindernisse bewältigen konnte.

Meinem Lebenspartner Mario danke ich für sein Verständnis und sein Vertrauen in den von mir gewählten Weg.

Ich möchte allen danken, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit behilflich waren.

Für meine Familie  
**Ernst und Monika,**  
**Tamara und Mario**

# **Zusammenfassung**

Seit einigen Jahren verwendet man die Messung der magnetischen Suszeptibilität als eine rasche und flächendeckende Methode zur Kartierung von Schwermetallbelastungen von Böden. Aufgrund der Tiefenverteilung der magnetischen Suszeptibilität ist es möglich eine Abgrenzung zwischen geogen und anthropogen belasteten Böden zu machen.

Ziel der Arbeit war die Erfassung einer möglichen Belastung von Böden im Raum Hüttenberg, wo praktisch über zweitausend Jahre hinweg Eisenbergbau stattfand. Hierbei ging es nicht nur um die Verbreitung der anthropogen gebildeten Partikeln mittels Wind aus den bereits bekannten Verhüttungsstandorten, sondern auch um die Möglichkeit der Erfassung von römischen bzw. mittelalterlichen Schlackenplätzen. Außerdem konnten Anomalien in einigen Bereichen des Gebietes auf anstehendes Erz (den Eisernen Hut) zurückgeführt werden.

Im Zuge der Geländearbeit wurde ein Messfeld von 16 km<sup>2</sup> in einem Raster von 250 x 250 m untersucht. Mit Hilfe der in situ-Werte, der spezifischen Suszeptibilität und der Frequenzabhängigkeit ergaben sich drei große Anomalien im Bereich von Heft, Hüttenberg und der Kreuzung Görtschitztal – Löllinggraben, welche teilweise auf menschliche Aktivitäten zurückgehen, und vier kleinere punktuelle Anomalien in Lölling, Untersemlach, Knappenberg und am Großkoll. Außerdem wurde über das gesamte Arbeitsgebiet ein Profil ausgewählt, entlang dessen siebzehn 30 cm lange Bodenkerne entnommen wurden, an welchen die Tiefenverteilung der Suszeptibilität gemessen wurde. Diese Kerne dienten der Identifikation der magnetischen Phasen mit Hilfe der mineralmagnetischen Untersuchungen, der Mikrosonde und der Ramanspektrometrie. Um einen möglichen Zusammenhang zwischen bestimmten Schwermetallen und der Suszeptibilität zu erhalten, wurden chemische Analysen (RFA) durchgeführt. Die Identifizierung der eisenhaltigen Minerale erfolgte mittels Röntgendiffrakometrie.

Aufgrund der Messergebnisse konnte im südlichen Teil des Arbeitsgebietes ein Zusammenhang der auftretenden Anomalie mit der sich dort befindlichen Lithologie festgestellt werden. Sowohl die Plankogelvererzungen als auch die Mn-reichen Erze des Arbeitsgebietes und die Lage einer Bodenprobe über einem Serpentinitt konnte mit Hilfe der unterschiedlichsten Analysen nachgewiesen werden. Im Bereich

Knappenberg konnte ein nicht kartierter Marmorzug erfasst werden und am Großkoll gibt es Hinweise auf einen früheren Verhüttungsplatz.

# **Abstract**

For many years now, measuring magnetic susceptibility has been used as a quick and extensive method for mapping heavy metal burdens of soils. The depth distribution of magnetic susceptibility enables a differentiation between geogenic and anthropogenic loaded soil.

The aim of this work was the evaluation of possible loaded soils in Hüttenberg, an area characterized by an iron mining tradition more than two thousand years old. It was not only about the familiar distribution of anthropogenic caused particles through wind from the smelting sites, but also about the possible evaluation of Roman and medieval slag heaps. In addition it was possible to trace anomalies in some areas back to in-situ ore (iron hat).

In the course of fieldwork a measuring field of 16km<sup>2</sup> in a grid of 250 x 250m was examined. With the aid of in-situ values, specific susceptibility and frequency-dependence, three major anomalies in the regions of Heft, Hüttenberg and the intersection Görtschitztal – Löllinggraben, which can partly be traced back to human activities, as well as four minor isolated anomalies in Lölling, Untersemlach, Knappenberg and Großkoll, were identified. Moreover, the entire working area was characterized by a profile, along which seventeen soil cores of a length of 30cm were extracted in order to measure the depth distribution of the susceptibility. These cores were used to identify magnetic phases by means of mineral magnetic examinations, microscope and Raman spectroscopy. In order to determine a possible connection between specific heavy metals and susceptibility chemical analyses (RFA) were carried out. The identification of the ferrous minerals was performed using X-ray diffractometry.

The occurring anomaly shows a relation to the lithology in the southern part of the area under investigation, based on the results of the susceptibility measurements. Both, the Plankogel mineralisation, and the Mn-rich ores in the study area, as well as one soil sample above a serpentinite could be identified, on the basis of the varying analyses carried out in this investigation. In the Knappenberg area an unknown marbel horizon could be identified, and an indication for an ancient processing plant was found at the Großkoll.

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Einleitung	2
1.1.1 Aufgabenstellung	2
1.1.2 Arbeitsgebiet	3
1.2 Geologischer Überblick	4
1.2.1 Sau- und Koralpe	8
1.2.1.1 Tektonisch – metamorphe Entwicklung	9
1.2.1.2 Sideritbezirk Hüttenberg	10
1.2.1.3 Minerale des Hüttenberger Erzberges	11
1.2.2 Gurktaler-Decke	11
1.3 Bergbaugeschichte	13
1.4 Umweltmagnetik	15
2 Grundlagen	16
2. Grundlagen	17
2.1. Magnetische Eigenschaften	17
2.2 Klassifizierungen magnetischer Materialien	18
2.2.1 Diamagnetismus	18
2.2.2 Paramagnetismus	18
2.2.3 Ferromagnetismus	20
2.2.4 Antiferromagnetismus	22
2.2.5 Ferrimagnetismus	22
2.3 Magnetische Hystereseschleife	23
2.4 Magnetische Korngröße	24
3 Methodik	26
3.1 Geländearbeiten Teil 1	27
3.1.1 Insitu-Feldmessungen	29
3.2 Laborarbeiten Teil 1	29
3.2.1 Bestimmung der spezifischen Suszeptibilität und Frequenzabhängigkeit	29
3.2.2 Bestimmung der Masse und des Wassergehaltes der Probe	30
3.2.3 Magnetische Sättigung, Sättigungsremanenz SIRM	30
3.3 Geländearbeiten Teil 2	31
3.4 Laborarbeiten Teil 2	31
3.4.1 Bestimmung der Suszeptibilität	31
3.4.2 Zerteilung der Bodenprofile	34
3.4.3 Sieben	36
3.4.4 Mahlen	36
3.4.5 Chemische Analyse	36
3.4.6 Magnetseparation	37

3.4.7 Röntgendiffraktometrie	37
3.4.8 Mikrosonde	38
3.4.9 Raman	39
3.4.10 Curietemperatur	41
4 Ergebnisse	43
4.1 Geländearbeiten Teil 1	44
4.1.1 In situ-Feldmessungen	44
4.2 Labormessungen Teil 1	47
4.2.1 Spezifische Suszeptibilität, Frequenzabhängigkeit, Volumenssuszeptibilität	47
4.2.2 Magnetische Sättigung, Sättigungsremanenz (SIRM)	50
4.2.3 Massensuszeptibilität gegen Seehöhe	52
4.3 Geländearbeit Teil 2	54
4.3.1 Vertikale Suszeptibilitätsverteilung	54
4.4 Laborarbeiten Teil 2	54
4.4.1 Suszeptibilitätsbestimmung	54
4.4.2 Chemische Analyse	57
4.4.3 Röntgendiffraktometrie	63
4.4.4 Mikrosonde	66
4.4.5 Ramananalyse	74
4.4.6 Curietemperaturbestimmung	75
5 Interpretation	78
6 Verzeichnisse	83
6.1 Literaturverzeichnis	84
6.2 Abbildungsverzeichnis	89
6.3 Tabellenverzeichnis	93
Anhang	

# 1 Einleitung

## 1.1 Einleitung

### 1.1.1 Aufgabenstellung

Die vorliegende Diplomarbeit stellt einen Beitrag zur flächenhaften Untersuchung von Böden mittels geophysikalischer Messmethoden dar. Schon seit mehreren Jahren werden am Lehrstuhl für Geophysik der Montanuniversität Leoben magnetische Messmethoden für die Erfassung und Charakterisierung von Umweltbelastungen herangezogen (Maier, 2002; Hemetsberger, 2002; Hanesch & Scholger 2002 und weitere).

Ziel der Arbeit war die Abgrenzung von geogen bzw. anthropogen beeinflussten Böden im Raum Hüttenberg in Kärnten. Dazu wurde die flächenhafte Suszeptibilitätsverteilung ermittelt. Anschließend wurden siebzehn Bodenprofile entnommen und deren vertikale Suszeptibilitätsverteilung bestimmt.

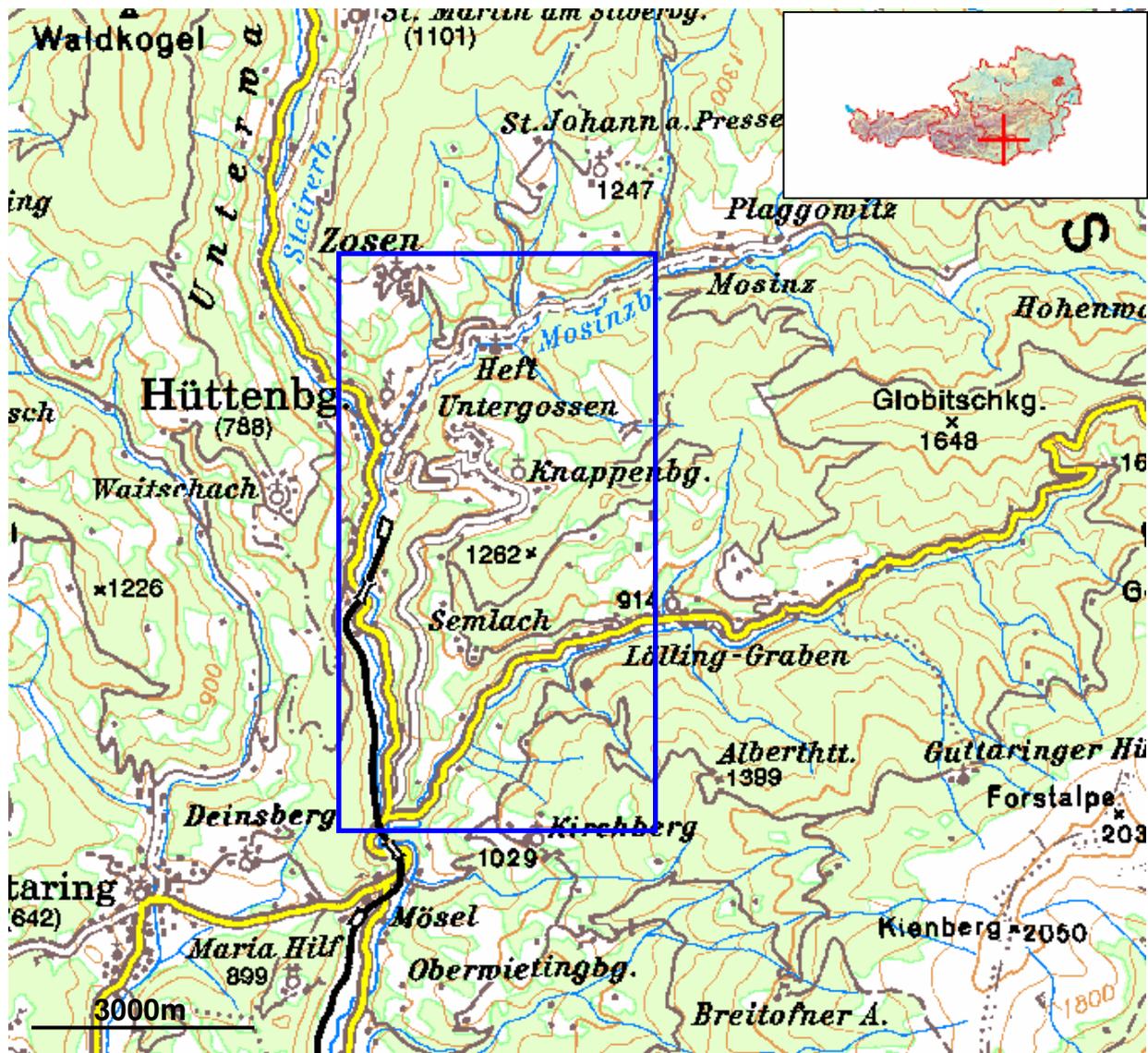
Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den Schwermetallen und der Suszeptibilität zu erfassen, wurde eine chemische Analyse durchgeführt. Der Ermittlung der eisenhaltigen Minerale diente eine Röntgendiffraktometrie. Zur optischen Charakterisierung der magnetischen Phasen dienten eine Mikrosondenanalyse sowie eine Ramanspektrometrie.

Die Arbeit wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes durch den FWF (Projektur P20688-N19) mit finanzieller Unterstützung am Lehrstuhl für Geophysik, der Montanuniversität Leoben unter der Betreuung durch Herrn Dr. Robert Scholger durchgeführt.

### 1.1.2 Arbeitsgebiet

Das Arbeitsgebiet befindet sich im Osten von Kärnten, an der Grenze zur Steiermark.

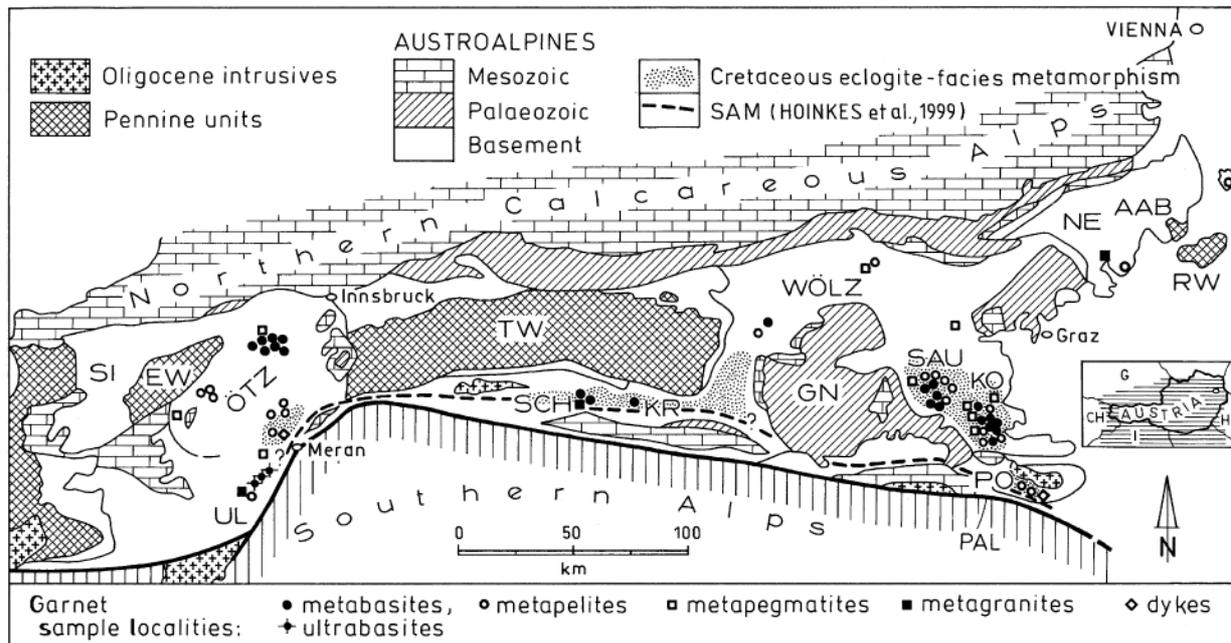
Das bearbeitete Gebiet wird im Süden vom Löllinggraben und im Westen vom Görtschitztal begrenzt. Die Grenze im Osten wird durch eine Verbindungslinie zwischen Mosinz und Lölling gebildet. Es umfasst eine Fläche von rund 16 km<sup>2</sup>. (Abbildung 1).



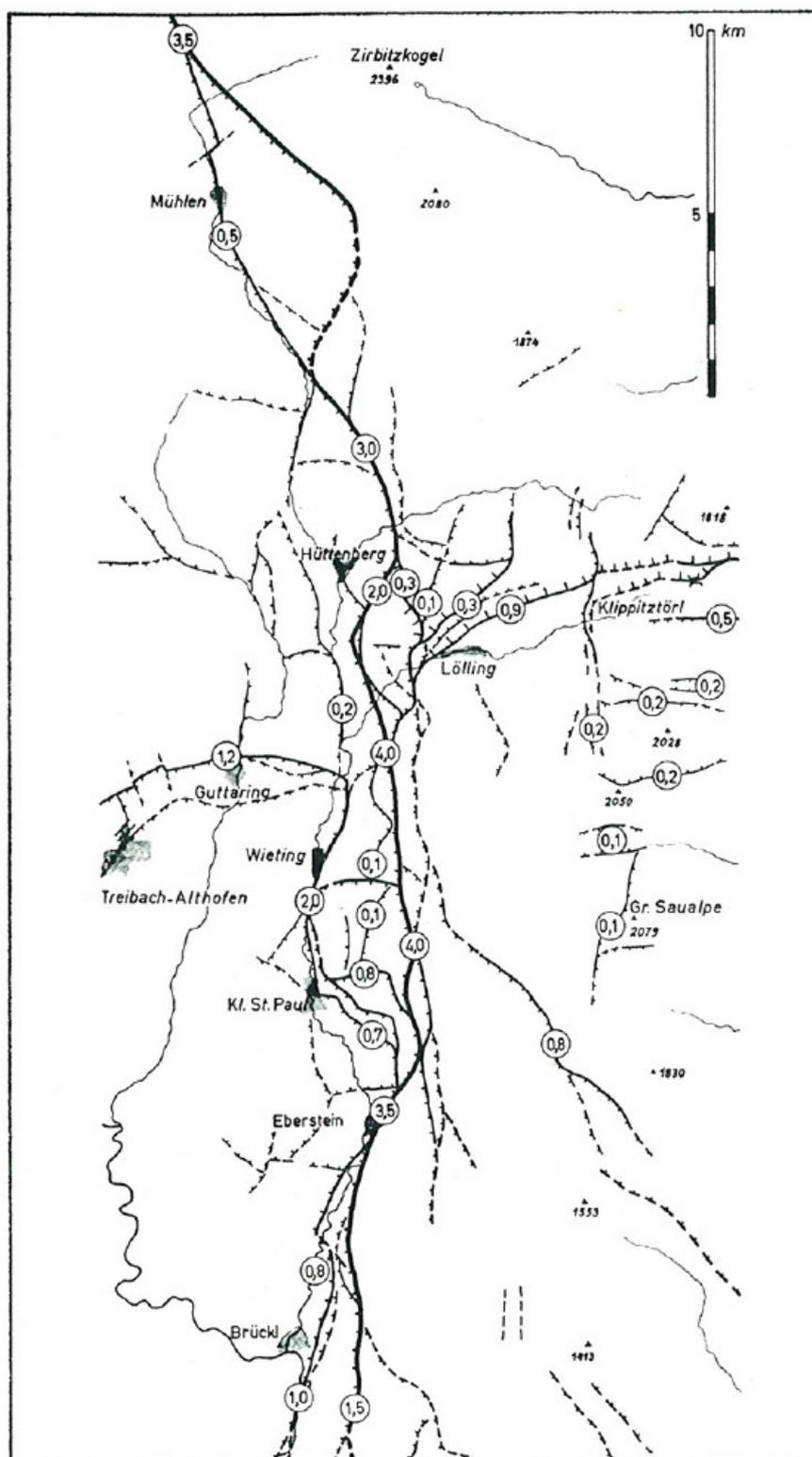
**Abbildung 1:** Geographische Lage des Arbeitsgebietes im Raum Hüttenberg, (AUSTRIAN MAP 1.0 – ÖK 186/187)

## 1.2 Geologischer Überblick

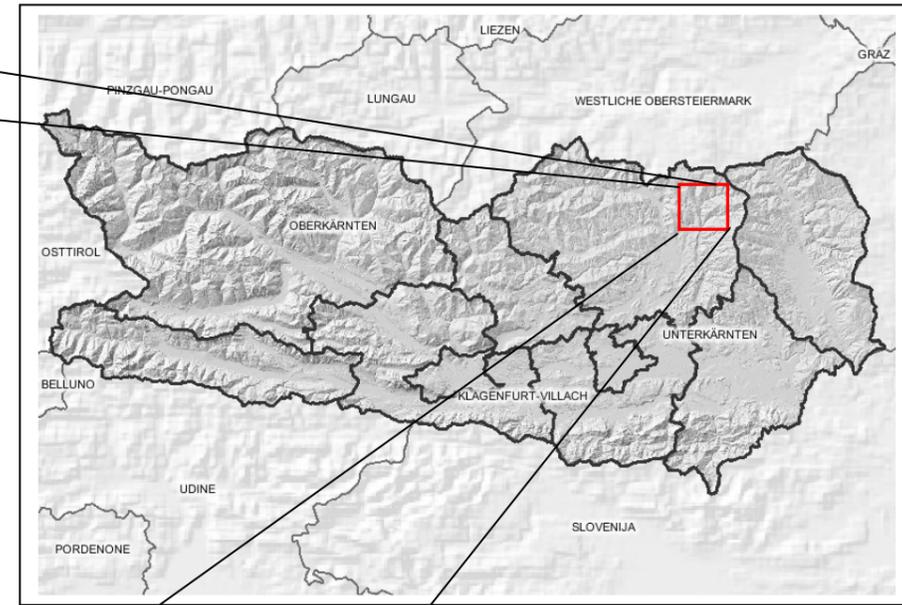
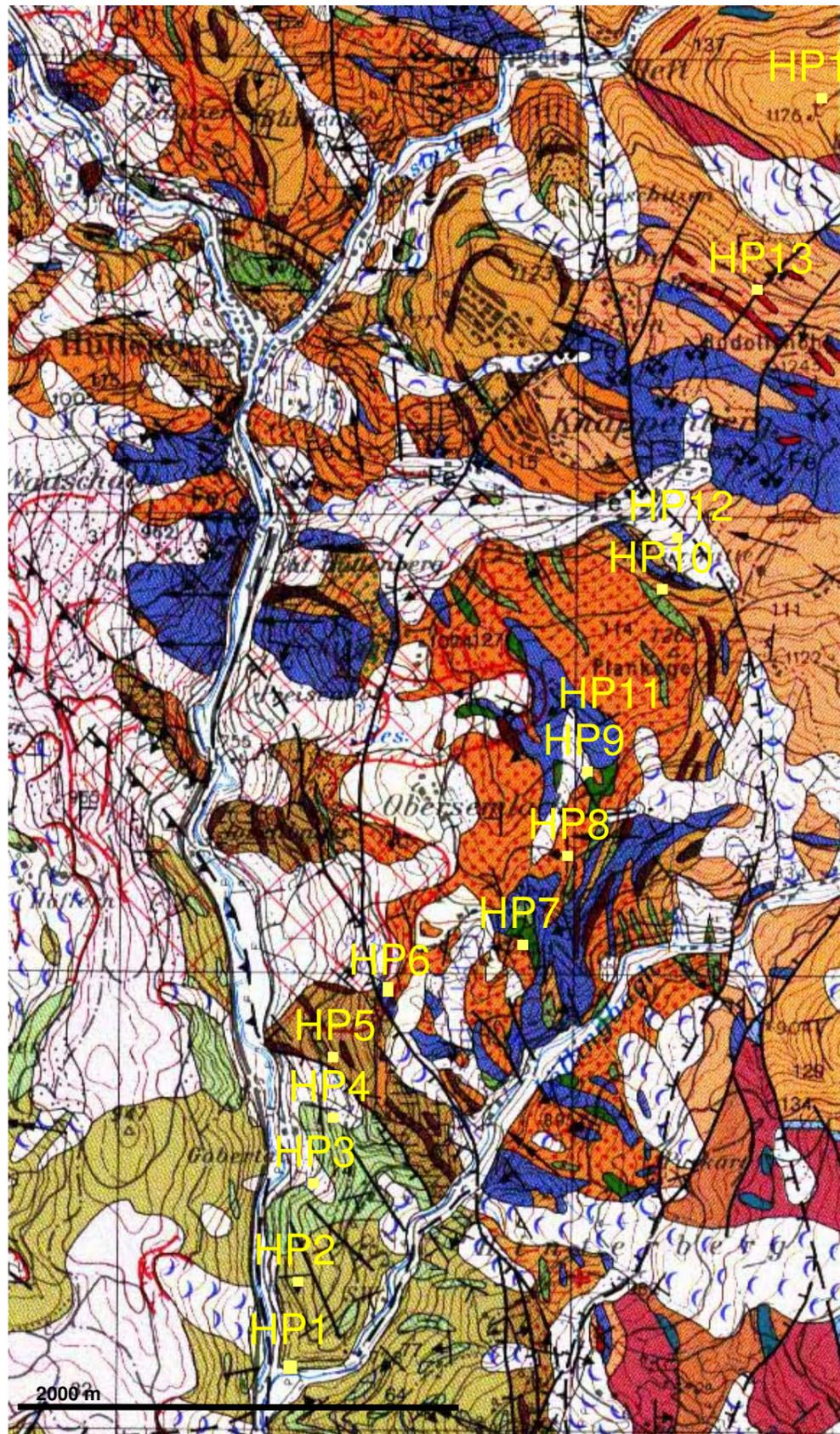
Das Arbeitsgebiet befindet sich in der Saualpe (Abbildung 1) und wird von Schmid et al. (2004) in das Ostalpine Koralpen – Wölzer Deckensystem gestellt (Abbildung 2). Die Saualpe ist durch die miozänen Störungssysteme des Lavant- und Görttschitztals (Abbildung 3) und durch das östliche Klagenfurter Becken begrenzt (Tollmann, 1977)



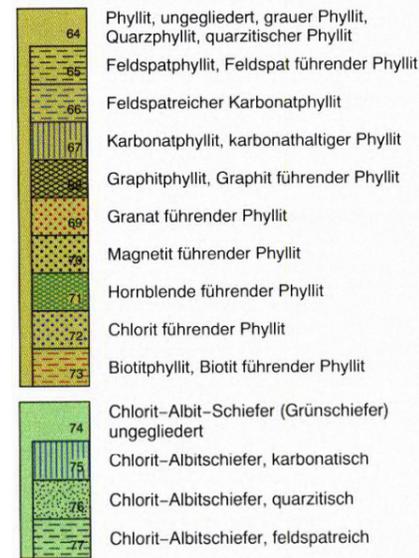
**Abbildung 2:** Großtektonischen Überblick des Ostalpins nach THÖNI (2002) – SI = Silvretta, ÖTZ = Ötztal; SAU = Saualpe; KOR = Koralpe; PO = Bacherengebirge (Slowenien); GN = Gurktaler Decke; TW = Tauern Fenster; EF = Engadiner Fenster; RW = Rechnitzer Fenster und PAL = Periadriatische Naht.



**Abbildung 3:** Das Görtschitztaler Bruchsystem am Westrand der Saualpe nach E. Clar et al. (1963). Die Zahlen in den Kreisen geben die Versatzbeträge in Kilometern an. (aus Tollmann, 1977).



Gurktaler Decke

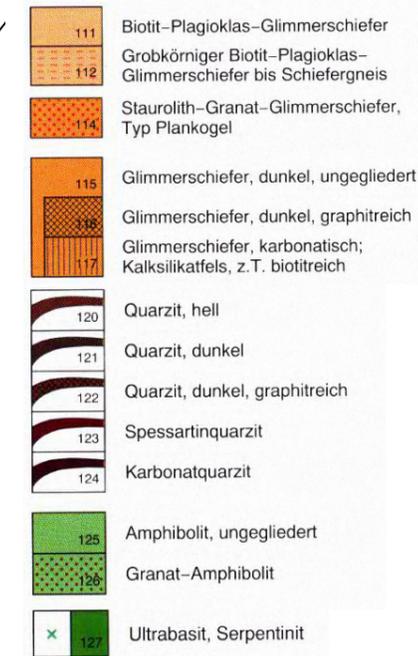


Schuppenzone



Kristallin der Saualpe

Glimmerschieferkomplex



Schiefergneiskomplex

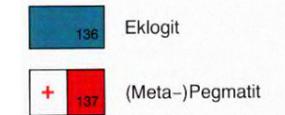


Abbildung 4: Geologische Karte des Gebiets Hüttenberg (nach Thiedig et al., 1999). Blatt 186 St.Veit.

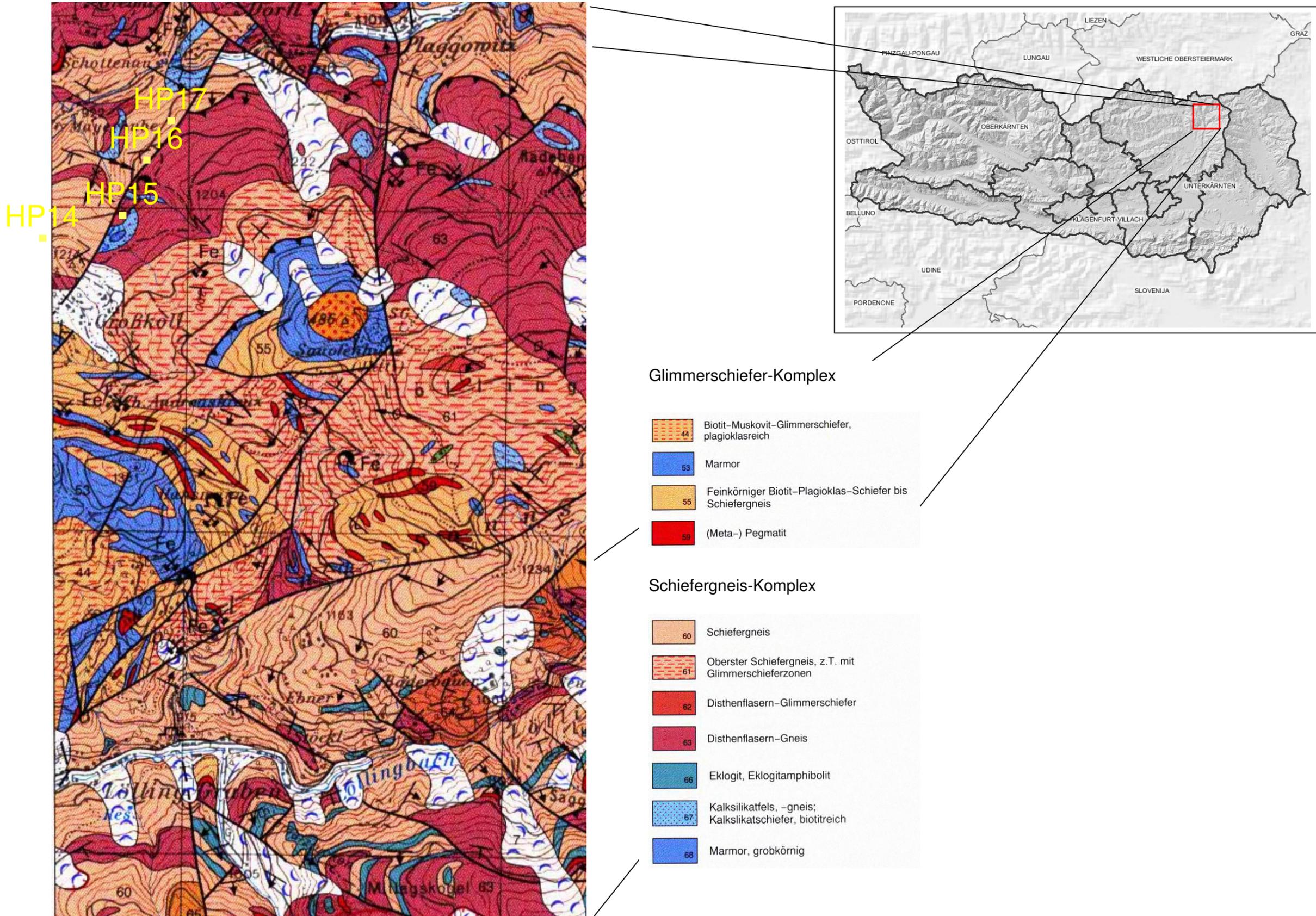


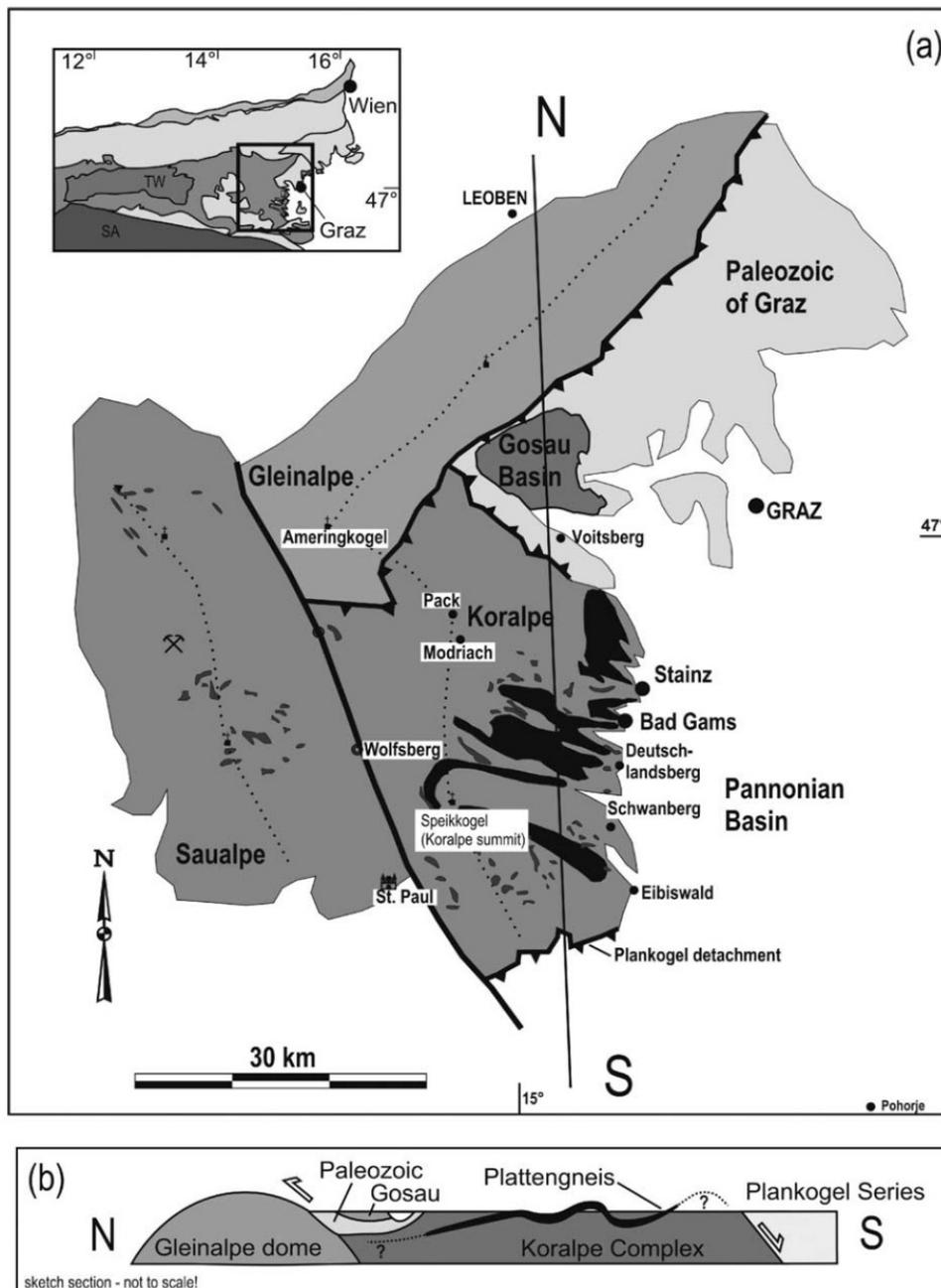
Abbildung 5: Geologische Karte des Gebiets Hüttenberg (Pistotnik et al., 2000). Blatt 187 Bad St.Leonhard.

Das Arbeitsgebiet wird wegen der Aufteilung auf zwei Blattschnitte, welche eine unterschiedliche Legende besitzen, in zwei Abbildungen dargestellt (Abbildung 4 und 5).

### **1.2.1 Sau- und Koralpe**

Lithologisch unterscheidet sich die Saualpe nicht von der Koralpe. Der größte Teil Kristallin der Sau- und Koralpe entstand während der Eo-Alpinen Hochdruckphase (Habler & Thöni, 2001).

Das Gebiet besteht aus hochgradigen Gneisen mit Einschaltungen von unterschiedlich großen Eklogitkörpern (Putz et al., 2005). In der Koralpe gibt es Plattengneise mit Linsen von Pegmatit, Marmor, Gabbro-Eklogit-Amphibolite, Kalksilikate sowie Orthogneise (Putz et al., 2005; Miller & Thöni, 1997). In der Saualpe handelt es sich um Disthenflasergneise (Habler & Thöni, 2001), mit Linsen aus staurolit- und kyanitgebundenen Glimmerschiefern sowie Eklogit-, Amphibol- und Marmorlinsen (Thöni & Miller, 1996).



**Abbildung 6:** Lage der Kor- und Saualpe im Kor- und Wölzer Deckensystem. (aus Putz et al., 2006).

### 1.2.1.1 Tektonisch – metamorphe Entwicklung

Die Metapelite der Kor- und Saualpe zeigen eine polymetamorphe Geschichte (Habler & Thöni, 2001). Die heutige Struktur der Ostalpen ist das Resultat zweier Kollisionsprozesse während der Alpidischen Orogenese (Kurz & Fritz, 2003). Die erste Kollision erfolgte während der Kreide (Eo-Alpines Ereignis), die zweite (Neoalpine) Kollision im Paläozän. Nach beiden Kollisionsphasen kam es zur Extension. Der Eklogit im Bereich der Kor- und Saualpe befindet sich in der größten

Region der Ostalpen, die hochdruckmetamorphe Gesteine der Eo-Alpinen Orogenese beinhaltet (Tenczer & Stüwe, 2003). Die spät-alpidische Strukturentwicklung steht im Zusammenhang mit der Heraushebung metamorpher Kernkomplexe, der Anlage der Gosabecken (Krappfeld–Gosau) und der miozänen Escape–Tektonik. Hervorzuheben sind vor allem NNW – SSE – streichende dextrale Störungssysteme. Das Lavanttal System trennt, morphologisch und durch miozäne Sedimentbecken nachgezeichnet, die Kor – von der Saualpe (Abbildung 6). Das die W-Grenze der Saualpe bildende Görttschitzalsystem (Abbildung 3) dürfte bereits während der Anlage der Krappfeld – Gosau wirksam gewesen sein (Ebner, 1997). Die im Bereich Hüttenberg – Lavanttal – Seetaler Alpe weit verbreiteten Fe-Vererzungen zeigen eine auffällige Bindung an diese Bruchsysteme. Im Sideritbezirk Hüttenberg liegen in amphibolitfaziell geprägten Marmoren des Saualm-Kristallins zahlreiche, mehrere Meter mächtige Sideriterzlager. Sie sind in die Bruchtektonik einbezogen, daneben liegen aber auch metasomatische Vererzungsbilder vor. Bezüglich ihrer Genese werden Modelle einer prä-metamorphen, synsedimentären (hydrothermalen) Fe- Anreicherung und/oder niedrigtemperierter, alpidischer Metasomatose im Nahbereich des Görttschitztaler Störungssystems diskutiert (Ebner, 1997).

### **1.2.1.2 Sideritbezirk Hüttenberg**

In mesozonal-metamorphen Marmorzügen des Saualmkristallins liegen zahlreiche, bis zu mehrere Meter mächtige Sideriterzkörper in stoffparalleler Anordnung (Schulz & Schroll, 1997). Eine Reihe von vorwiegend NE gerichteten Störungen gliedert die Lagerstättenkörper. Die Erzkörper selbst stellen Platten, flache Linsen, auch unregelmäßige Walzen und Stöcke dar (Tollmann, 1977). Die Erzparagenese besteht im Wesentlichen aus manganführendem Siderit, Ankerit und Pyrit. In den bergmännischen Abbau einbezogen war auch der Eiserne Hut mit Limonit, Wad und Pyrolusit (Schulz & Schroll, 1997). Erzlager samt Nebengestein sind in den regional dominierenden, mittelsteil einschiebenden axialen Faltenbau einbezogen (Fuchs, 1978,1980; Schulz, et al. 1986). Die Verformungen sind durch intensive Biegegleit- und Scherfaltung sowie durch Scher- und Zerrklüftbildung geprägt.

Für die Anreicherung des Eisens im Sedimentationsraum wird eine hydrothermale Zufuhr für wahrscheinlich gehalten (Schulz & Schroll, 1997).

### 1.2.1.3 Minerale des Hüttenberger Erzberges

Der Hüttenberger Erzberg enthält mit seinen Nebengesteinen gut 150 Mineralarten. Die primäre Mineralparagenese der Eisenspatvererzung von Hüttenberg umfasst nach Meixner (1975) im Gesamtbereich der Lagerstätte Siderit, Sideroplesit, Ankerit, Braunspat, Dolomit, Kalzit, ferner Pyrit, Markasit, Magnetkies, Quarz, Magnetit, Zinkblende, Anatas, Brookit, Rutil etc. Im Ostteil des Lagerstättenraumes kommen As-, Bi-, Ni-, Co-, Mo-, Au-, Ag- und U-Erze hinzu, im Westteil Cu-, Pb- und Sb-Erze mit Baryt als Gangart (Tollmann, 1977). Nur Löllingit (Haidinger, 1845) und Kahlerit (Meixner, 1953) sind besondere Mineralfunde des Hüttenberger Erzberges (Meixner, 1981).

### 1.2.2 Gurktaler-Decke

Intern zeigt der Gurktaler Deckenkomplex (Abbildung 7) mit der liegenden Murauer und der hangenden Stolzalpen-Decke zwei sich in Fazies und Metamorphosegrad unterscheidende Deckeneinheiten. Dazu kommt in höchster Position die Ackerl-Decke mit kristallinen Gesteinen und permomesozoischen Deckensedimenten (von Gosen et al., 1985).

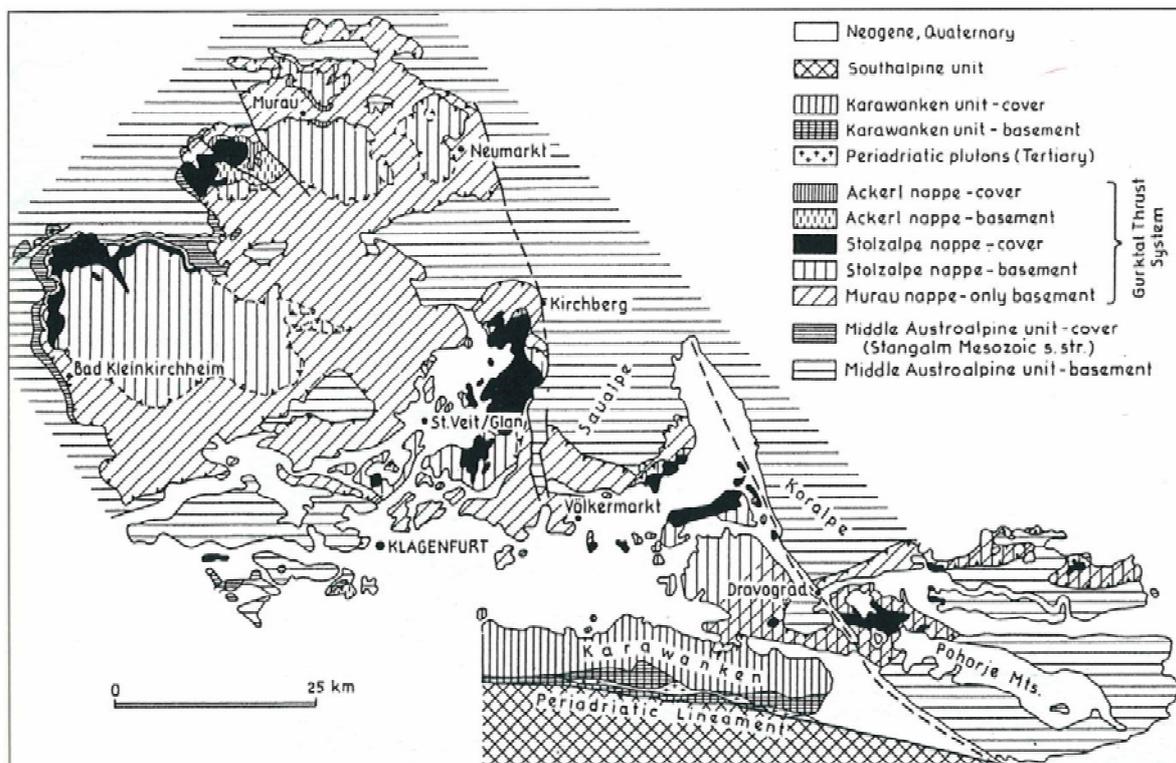


Abbildung 7: Tektonische Gliederung des Gurktaler Deckensystems (aus Neubauer, 1987).

### **Murauer-Decke**

Der typische Gesteinsbestand der Murauer-Decke umfasst metapelitische Gesteine mit Einschaltungen von verschiedenen Grünschiefern, Schwarzschiefern und Graphitquarziten (von Gosen et al., 1985). Nach Tollmann (1977) treten zwischen Karbonatgesteinen mächtige phyllitische Serien auf, in die diverse basische und saure Vulkanite eingeschaltet sind. Vergleichbare Schichtentwicklungen finden sich auch in der Phyllitgruppe der südlichen Saualpe und im nördlichen Karawankenvorland (Tollmann 1977).

### **Stolzalpen-Decke**

Die Stolzalpen-Decke zeigt eine interne Struktur mit Schuppen unterschiedlicher Entwicklungen (Neubauer, 1979). Die Schichtfolge setzt generell mit mächtigen mafischen Vulkaniten ein, über denen pelitisch/psammitische Sedimente folgen (von Gosen et al., 1985). An die vulkanogen beeinflussten Gesteinsserien sind Magnetit/Hämatit-Vererzungen gebunden (Tollmann, 1977).

### **Ackerl-Kristallin**

Das Ackerl-Kristallin ist ein mittelgradig metamorpher Komplex, der sich aus Glimmerschiefern, Staurolith-Biotit-Plagioklasgneisen, sauren Orthogneisen und Quarziten zusammensetzt (Neubauer, 1987).

### **Permomesozoikum**

Die postvariszische Sedimenthülle ist vor allem am nordwestlichen Deckenrand und im Raum Griffen-Eberstein erhalten (Neubauer, 1987).

### **Krappfeld-Gosau**

Die permomesozoischen Abfolgen Mittelkärntens werden im Raum Griffen – Eberstein von der Oberkreide-Paläogen-Entwicklung des Krappfeldes überlagert. Ihre Reste sind mit einer Mächtigkeit bis zu ca. 500 m in einer miozänen Grabenstruktur erhalten geblieben.

Die Anlage dieses ursprünglich weiter verbreiteten Beckens ist im Zusammenhang mit der oberkretazischen Exhumierung des Saualmkristallins und der Anlage der Görtschitztalstörung zu sehen (Neubauer, 1992).

## 1.3 Bergbaugeschichte

Unmittelbar nach der Eroberung des Königreichs Noricum durch die Römer im Jahre 16 v. Chr. wurden Brauneisensteinvorkommen bei Hüttenberg und Lölling sowie in der Mosinz in Abbau genommen. Wie in den anderen römischen Provinzen waren die Bergwerke auch in Noricum Staatseigentum. Das Bergregal wurde von der Finanzverwaltung ausgeübt. Als Bergregal wurde das Hoheitsrecht unter Ausschluss aller, auch der Grundeigentümer, über bestimmte Mineralien zu verfügen, bezeichnet. Ein Gesetz für die Eisenbergwerke – die *lex ferraria* regelte ihren Betrieb (Weisz, 1981). Der Staat verkaufte im Versteigerungswege die Grube an Private und hob von ihnen jährliche Abgaben ein, deren Eintreibung mitunter verpachtet wurde. Die Grubeninhaber wurden in ein Gewerkenbuch eingetragen. Das norische Eisen behielt seine Bedeutung bis in die späte Kaiserzeit bei. Mit der zunehmenden Schwäche des römischen Imperiums verfiel der Bergbau immer mehr und fand im 5. Jahrhundert eine letzte Erwähnung (Weisz, 1981).

Nach einer Pause von mehr als fünfhundert Jahren wurden ab dem 11. Jahrhundert im Hüttenberger Raum wieder Bergwerke betrieben. Bis in das 12. Jahrhundert betrachtete man Bodenschätze wie Salz oder Erze als Bestandteil des Grundeigentums. Von den Betreibern eines Bergwerks wurde dem Grundherrn ein Zehent abgeliefert. Ab der Mitte des 12. Jahrhunderts nahmen Kaiser und Könige das Bergregal in Anspruch. Aus dem Bergregal entwickelte sich die Bergbaufreiheit, das Recht auch auf fremdem Grund und Boden, unter den vom Regalherrn vorgeschriebenen Bedingungen Bergbau zu treiben (Weisz, 1981). Der Abbau der Erze in Hüttenberg erfolgte anfangs durch hörige Bauern in kleinen Tagebauen, die in der Ausbisszone der Lagerstätte angelegt wurden. Aufgrund der Nachfrage nach Eisen mussten diese Abbaue geregelten Bergwerken weichen.

Zu Beginn des 18. Jahrhunderts bewirkte der Betrieb von Floßöfen eine Steigerung des Erzbedarfs. Die Einführung des Sprengverfahrens durch Tiroler Knappen in den Jahren 1708-1710 half die Erzerzeugung zu erhöhen. Ab dem Jahr 1858 änderte sich die Wirtschaftslage vollständig. Die wechselnde Zollpolitik führte zu Schwierigkeiten beim Handel mit Ungarn, der Bahnbau stockte vorübergehend und am Weltmarkt machte sich die ausländische Konkurrenz bemerkbar. Der verlorene Krieg gegen Italien führte 1859 zu einer schweren Absatzkrise. Die schlechte verkehrsmäßige Erschließung Kärntens durch Bahnen verschlimmerte die Lage

(Weisz, 1981). Erst ab dem Jahr 1867 trat nach einer innenpolitischen Festigung durch den Ausgleich mit Ungarn eine Besserung der Verhältnisse ein. Die während der Krisenzeiten veralterten Anlagen machten Modernisierungen erforderlich, die von den einzelnen Unternehmungen nicht mehr alleine getragen werden konnten. Aus diesem Grund schlossen sich die Hüttenberger Gewerke zu einer Aktiengesellschaft zusammen, so wurden die notwendigen Modernisierungen möglich. Da es zu keiner Stabilisierung der Wirtschaft kam, entschloss sich das geschwächte Unternehmen 1881 unter Aufgabe der Selbständigkeit der neu gegründeten Österreichisch-Alpinen Montangesellschaft beizutreten (Weisz, 1981). Während des Ersten Weltkrieges erfuhr der Bergbau infolge des Ausfallens der küstenländischen Manganerzgruben einen gewaltigen Aufschwung. Die Bergbau-Wirtschaftskrise führte zu einer Stilllegung des Hüttenberger Bergbaus in den Jahren 1932-1935. Ab der Betriebswiederaufnahme im Mai 1935 stieg die Förderung laufend, um in den Kriegsjahren 1940/41 Höhepunkte zu erreichen. Durch den stark forcierten Abbau der Erzvorräte in den Kriegsjahren schien der Bergbau 1954/55 einem Ende entgegenzugehen. Dank vorbildlicher Zusammenarbeit zwischen Forschung und Betrieb konnte durch Feststellung neuer Erzsubstanz der Fortbestand des Bergbaues auf mehrere Jahrzehnte gesichert werden. 1978 wurde der Bergbau nach fast tausendjährigem ununterbrochenem Betrieb eingestellt (Weisz, 1981).

## 1.4 Umweltmagnetik

Umweltmagnetik ist eine relativ neue Wissenschaft. Geboren wurde diese Disziplin aus einer Menge fächerübergreifender Disziplinen. Schon bald wurde sie ein Teil der Forschung an marinen Sedimenten, Windablagerungen und Böden. Es gibt zwei Arten von Material, welches untersucht werden kann: Zum einen handelt es sich um Komponenten, die verfrachtet wurden, zum anderen um in Situ gebildete Substanz. Der Materialfluss findet in der Hydrosphäre sowie der Atmosphäre statt (Evans, 2003). Magnetische Minerale, hauptsächlich Eisenoxide, findet man überall, weil Eisen eines der häufigsten Minerale der Erdkruste ist. Meist sind sie nur in geringen Mengen zu finden, doch lassen sie sich leicht, schnell und zerstörungsfrei messen (Evans, 2003). Die Eigenschaft magnetischer Minerale (z.B.: Eisenoxide), Schwermetalle zu absorbieren, adsorbieren bzw. in bestimmten Fällen in ihrer Struktur einzubauen, ist die Ursache für den Zusammenhang zwischen der Suszeptibilität und den Schwermetallkonzentration (Maher et al., 1999). Bei partikulärem Schwermetalleintrag (Verbrennungsrückstände, usw.) ist dies von besonderer Bedeutung, da industriell entstandene magnetische Minerale und Schwermetalle einen gemeinsamen Ursprung und eine gemeinsame Existenz zeigen. Somit können die magnetischen Eigenschaften als „Tracer“ für Belastungen dieser Art verwendet werden (Maher et al., 1999). Außerdem bieten magnetische Messungen eine rasche und billige Möglichkeit, Umweltverschmutzungen zu detektieren (z.B. Dearing et al., 1996; Kapicka et al., 1999, 2001, 2003; Petrovský und Ellwood, 1999; Hoffmann et al., 1999; Magiera und Strzyszczyk, 2000; Hanesch und Scholger, 2002; und weitere). Messungen der magnetischen Suszeptibilität zeigten, dass es unter gewissen Umständen möglich ist, eine räumliche Abgrenzung zwischen verschmutzten und unverschmutzten Gebieten zu machen. Diese Methode basiert darauf, dass industrielle Prozesse, wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Flugaschen produzieren, welche eine große Menge an magnetischen Komponenten beinhalten (Fialová et al., 2005; Flanders, 1994, 1999). Diese Partikel werden durch die Atmosphäre transportiert und akkumulieren in den obersten Schichten der Böden. Ihre Konzentration kann dort ganz einfach mittels Oberflächensuszeptibilitätsmessungen detektiert werden (Fialová et al., 2005; Lecoanet et al., 1999).

# 2 Grundlagen

## 2. Grundlagen

### 2.1. Magnetische Eigenschaften

#### Magnetisches Moment $M$

Die Erscheinungen des Magnetismus lassen sich auf eine besondere Eigenschaft der Elektronen zurückführen. Jedes Elektron besitzt ein magnetisches Moment in Form eines Bahnmoments (durch die Bewegung der Elektronen auf Bahnen um den Atomkern) und zusätzlich ein Spinnmoment, das an seinen Drehimpuls gekoppelt ist. Die magnetischen Momente haben zur Minimalisierung der Energie die Tendenz, sich weitgehend zu kompensieren (Soffel, 1991).

#### Magnetisierung $J$

Bei einer unvollständigen Kompensation nennt man die Anzahl der resultierenden magnetischen Momente  $M$  in einer Volumeneinheit  $dV$  die Magnetisierung  $J$  oder die magnetische Polarisation (Soffel, 1991).

$$J = M/dV \quad [A/m] \quad (\text{Gleichung 1})$$

Wird  $J$  durch das Anlegen eines äußeren Magnetfeldes erzeugt, spricht man von einer induzierten Magnetisierung. Unabhängig vom äußeren Magnetfeld ist hingegen die remanente Magnetisierung (Soffel, 1991).

Die Magnetisierung eines para- oder ferromagnetischen Stoffs lässt sich auf die permanenten magnetischen Momente der einzelnen Atome oder Elektronen des Materials zurückführen (Tipler, 2004).

#### Suszeptibilität $k$ :

Die Proportionalitätskonstante zwischen der induzierten Magnetisierung  $J_i$  und dem äußeren Feld  $H_a$  nennt man die magnetische Volumenssuszeptibilität  $k$  (dimensionslose Größe) (Soffel, 1991).

$$J_i = k * H_a \quad [ ] \quad (\text{Gleichung 2})$$

## 2.2 Klassifizierungen magnetischer Materialien

### 2.2.1 Diamagnetismus

Diamagnetismus wird in Mineralen beobachtet, deren Moleküle kein permanentes magnetisches Moment besitzen, d.h. es gibt keine unkompensierten Momente. Solche Materialien sind aus Atomen aufgebaut, deren äußere Schalen voll besetzt sind (Tipler, 1995). Beispiele für solche Minerale sind in Tabelle 1 dargestellt.

Diamagnetische Stoffe haben das Bestreben, das Magnetfeld aus ihrem Inneren zu verdrängen. Sie magnetisieren sich gegen die Richtung eines externen Magnetfeldes, folglich ist die Suszeptibilität negativ. Ihre Beiträge sind im Allgemeinen temperaturunabhängig und ergeben sich nach dem Prinzip der Lenz'schen Regel. Sie sind damit in allen Materialien vorhanden, wenn auch meist nicht dominant. Diamagnetische Minerale spielen in der Umweltmagnetik praktisch keine Rolle, wohl aber bei gesteinsmagnetischen Labormessungen. Ein Diamagnetismus ist im Prinzip bei allen Stoffen vorhanden. Er wird bei vielen Substanzen durch einen sehr viel stärkeren Para- bzw. Ferromagnetismus überdeckt (Soffel, 1991).

Mineral	$k_{\text{dia}}$	Mineral	$k_{\text{dia}}$
Quarz ( $\text{SiO}_2$ )	-0.6	Kalkspat ( $\text{CaCO}_3$ )	-0.5
Forsterit ( $\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)$ )	-0.4	Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ )	-2.0
Orthoklas ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )	-0.6	Halit ( $\text{NaCl}$ )	-0.5
Zinkblende ( $\text{ZnS}$ )	-0.3	Graphit (C)	-7.8

**Tabelle 1:** Spezifische Suszeptibilität einiger diamagnetischer Minerale (in  $10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ ) (aus Soffel, 1991).

### 2.2.2 Paramagnetismus

Paramagnetische Mineralien (Tabelle 2) enthalten im Gegensatz zu den diamagnetischen Mineralien Ionen, die zum Teil mehrere nicht kompensierte magnetische Spinnomente besitzen. Hierzu zählen vor allem die Ionen der Eisengruppe. Die einzelnen magnetischen Momente besitzen untereinander bei

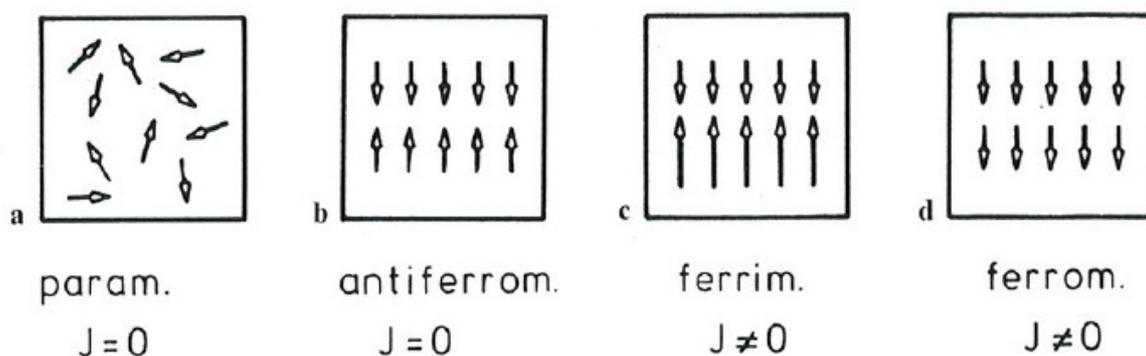
Raumtemperatur keine Wechselwirkung, und ihre Richtungen sind in einem Mineral deswegen nicht geordnet, sondern statistisch ungerichtet verteilt (Abbildung 8). Ohne ein äußeres Feld  $H_a$  ist in paramagnetischen Substanzen daher die Magnetisierung gleich Null.

Durch ein äußeres Feld wird den magnetischen Momenten eine Vorzugsrichtung aufgeprägt, die zu einem resultierenden magnetischen Moment und damit zu einer induzierten Magnetisierung  $J_i$  in Richtung von  $H_a$  führt. Deshalb ist die paramagnetische Suszeptibilität  $k_{para}$  positiv (Tabelle 2) (Soffel, 1991).

$$J_i = k_{para} * H_a \quad \text{(Gleichung 4)}$$

Mineral	$k_{para}$	Mineral	$k_{para}$
Olivine	5...130	Pyroxene	3...90
Amphibole	10...100	Granate	10...150
Biotit	6...100	Muskowit	-1...25
Cordierit	7... 40	Feldspäte	-0.5...30
Turmalin	2... 40	Pyrit	5...50
Serpentin	12... 48	Quarz	-0.6...5

**Tabelle 2:** Spezifische Suszeptibilität einiger paramagnetischer Minerale bei Normaltemperatur (in  $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) (aus Soffel, 1991).

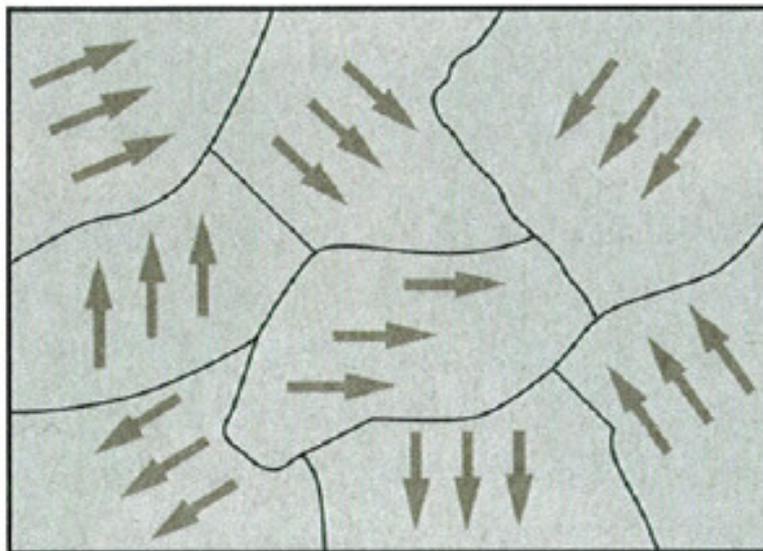


**Abbildung 8:** Ordnungszustände im Magnetismus; Pfeile: magnetische Momente. a Paramagnetismus (völlige Unordnung); b Antiferromagnetismus (strenge Ordnung, aber kein resultierendes Moment); c Ferrimagnetismus (strenge Ordnung mit einem resultierenden Restmoment); d Ferromagnetismus (strenge Ordnung mit einem resultierenden Moment) (aus Soffel, 1991).

### 2.2.3 Ferromagnetismus

Ferromagnetismus tritt auf, wenn die magnetischen Momente paramagnetischer Ionen stark miteinander in Wechselwirkung treten. Der reine Ferromagnetismus mit einer Parallelstellung aller vorhandenen, nicht kompensierten, magnetischen Momente tritt bei gesteinsbildenden Mineralien nicht auf, sondern nur bei den Metallen Eisen, Kobalt und Nickel sowie bei einigen künstlich hergestellten Granaten (Soffel, 1991).

Bei ferromagnetischen Materialien nimmt die magnetische Suszeptibilität sehr große Werte an. Schon schwache Magnetfelder führen bei diesen Materialien zu einer weit gehenden Ausrichtung der atomaren magnetischen Dipolmomente. In manchen Fällen bleibt diese Orientierung selbst nach Abschalten des äußeren Felds erhalten: Da die Wechselwirkung benachbarter magnetischer Dipole sehr stark ist, richten sich die magnetischen Momente in mikroskopisch kleinen Raumbereichen auch ohne äußeres Feld aneinander aus. Diese Raumbereiche nennt man Weiß'sche Bezirke (Abbildung 9) (Tipler, 2004).



**Abbildung 9:** Schematische Darstellung Weiß'scher Bezirke. Innerhalb jedes einzelnen Bezirks sind die magnetischen Momente ausgerichtet, aber die Richtung ist von Bezirk zu Bezirk verschieden. Das resultierende magnetische Moment ist folglich null. Bereits ein schwaches äußeres Magnetfeld kann eine Vergrößerung der Bezirke bewirken, in denen die Momente parallel zum Feld ausgerichtet sind oder zur Drehung der Orientierungsrichtung einzelner Bezirke führen. In beiden Fällen ist das resultierende magnetische Moment dann von null verschieden und parallel zum Feld gerichtet (aus Tipler, 2004).

Innerhalb eines Weiß'schen Bezirks sind alle magnetischen Momente ausgerichtet. Die Richtung der Orientierung ist allerdings von Bezirk zu Bezirk verschieden, weshalb das resultierende magnetische Moment einer mikroskopischen Probe des ferromagnetischen Materials normalerweise gleich null ist (Tipler, 2004).

### 2.2.4 Antiferromagnetismus

Beim Antiferromagnetismus sind die magnetischen Momente paarweise antiparallel ausgerichtet. Minerale, die Antiferromagnetismus aufweisen, sind in Tabelle 3 dargestellt.

Auch hier ist, allerdings in einer anderen Art und Weise als beim Paramagnetismus, die Summe der magnetischen Momente eines Teilvolumens ebenfalls gleich null und ohne ein äußeres Feld ist keine Magnetisierung vorhanden. Dreh- und Umklappprozesse führen zu einer dem äußeren Feld  $H_a$  parallel induzierten Magnetisierung  $J_i$  und einer positiven Suszeptibilität  $k_{\text{antif}}$  (Soffel, 1991).

Bei einer für jedes Material charakteristischen Temperatur  $T_n$  (Néel Temperatur) verschwindet die Ordnung der magnetischen Momente und das Material geht dann in einen paramagnetischen Zustand über. Oberhalb von  $T_n$  kommt es zu einer Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität gemäß dem Curie-Weiß'schen Gesetz (Soffel, 1991):

$$k_{\text{antif}} = C / (T + T_n) \quad \begin{array}{l} C... \text{ Curie Konstante} \\ T... \text{ absolute Temperatur} \\ T_n... \text{ Neel Temperatur} \end{array} \quad \text{(Gleichung 5)}$$

Mineral	$k_{\text{spez}}$	$T_n$	$\theta_a$	Struktur
Ilmenit ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_3$ )	150	55–68 K	–17 K	rhomboedrisch
Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	20	950 K	2940 K	rhomboedrisch
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	50	310 K	1070 K	rhomboedrisch
Ulvöspinell ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ )	100	115–120 K	?	kubisch
Wüstit ( $\text{FeO}$ )	100	190 K	195 K	kubisch

**Tabelle 3:** Einige magnetische Parameter von antiferromagnetischen Mineralien. Die Werte für die spezifische Suszeptibilität bei Normaltemperatur können erheblich variieren und sind in Einheiten  $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  angegeben (aus Soffel, 1991).

### 2.2.5 Ferrimagnetismus

Bei zahlreichen antiferromagnetischen Substanzen sind die magnetischen Momente häufig ungleich groß und in den Gittern so angeordnet, dass keine vollständige Kompensation der magnetischen Momente bei Abwesenheit eines äußeren Feldes auftritt. Man nennt diese Erscheinung nach Néel (1948) Ferrimagnetismus. Die magnetische Ordnung wird bei der so genannten Curie-Temperatur  $T_c$  zerstört. Oberhalb  $T_c$  sind diese Substanzen dann wiederum nur noch paramagnetisch, und es gilt das folgende Curie-Weiß'sche Gesetz (Soffel, 1991):

$$k_{\text{ferr}} = C / (T - T_c) \quad T_c \dots \text{ Curie Temperatur} \quad (\text{Gleichung 6})$$

Nach Soffel (1991) kann die unvollständige Kompensation der antiparallel gestellten magnetischen Momente folgende 3 Gründe haben:

- Verschieden große magnetische Momente der beteiligten paramagnetischen Ionen (Beispiel: Magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mit den Kationen  $\text{Fe}^{2+}$  mit 4 und  $\text{Fe}^{3+}$  mit 5 Bohr'schen Magnetonen);
- Eine Unterbesetzung eines Untergitters mit paramagnetischen Ionen und ein resultierendes Defektmoment (Beispiel: Magnetkies  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ );
- Abweichung von der exakten Antiparallelstellung der magnetischen Momente d.h. eine „Verkantung“ (spin canting). Ein Beispiel hierfür ist der Hämatit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

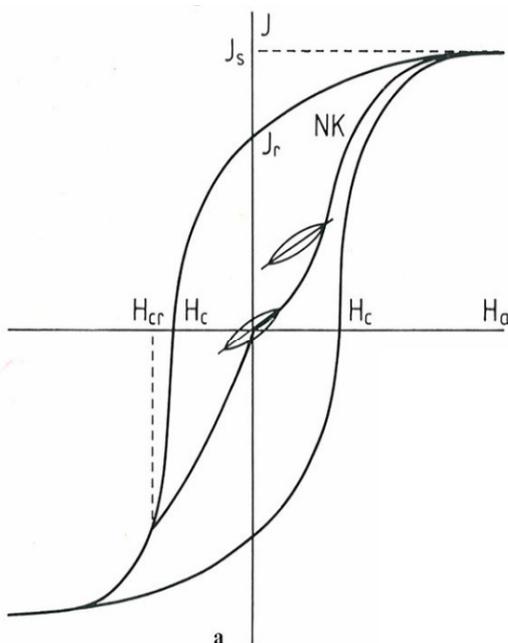
Die Curie-Temperaturen  $T_c$  sind charakteristische Materialkonstanten der Ferro(i)magnetika und können für diagnostische Zwecke zur Identifikation der einzelnen Mineralien verwendet werden (Soffel, 1991). Einige ferrimagnetischen Mineralien und ihre magnetischen Eigenschaften sind in Tabelle 4 dargestellt.

Mineral	$T_c$	$K_{\text{spez.}}$
Magnetit $\text{Fe}_2\text{O}_3$	578 °C	$10^6 \dots 10^7$
Titanomagnetite	-200 °C ... 578 °C	$10^2 \dots 10^7$
Maghämite	578 °C ... 675 °C	$10^5 \dots 10^7$
Hämatit	675 °C	$10^2 \dots 10^3$
Hämo-Ilmenite	-200 °C ... 675 °C	$10^2 \dots 10^5$
Magnetkies	325 °C	$10^3 \dots 10^5$
Goethit	110 °C	103
Greigit	270 °C ... 300 °C	$10^3 \dots 10^5$

**Tabelle 4:** Einige magnetische Eigenschaften der wichtigsten natürlichen Ferrite. Die Werte für die spezifische Suszeptibilität können erheblich variieren und sind in Einheiten  $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  angegeben (nach Soffel 1991).

### 2.3 Magnetische Hystereseschleife

Die magnetischen Kenngrößen, die im Paläo- und Gesteinsmagnetismus immer wieder auftreten, können am besten mit Hilfe der idealisierten Hystereseschleife (Abbildung 10) eines Ferro- oder Ferrimagnetikums erläutert und definiert werden (Soffel, 1991).



**Abbildung 10:** Hystereseschleife und Definition magnetischer Kenngrößen. Idealisierte Hystereseschleife;  $J$  Magnetisierung;  $H_a$  äußeres Magnetfeld;  $J_s$  Sättigungsmagnetisierung;  $J_r$  remanente Magnetisierung;  $H_c$  Koerzitivkraft oder Koerzitivfeldstärke;  $H_{cr}$  Remanenzkoerzitivkraft; NK Neukurve; Rayleighschleife an einem Punkt der Neukurve. Die Suszeptibilität  $k$  ist das Verhältnis  $J/H$ , die Anfangsuszeptibilität ist die Suszeptibilität bei Beginn der Neukurve (Soffel, 1991).

Ausgehend vom unmagnetischen Zustand erfolgt bei kleinen äußeren Feldern zunächst ein zu  $H_a$  proportionaler Anstieg von  $J$ . Der Anstieg dieser Kurve nimmt bei steigendem äußerem Feld zunächst zu, um dann bei starken Feldern immer weiter abzuflachen. Diesen Kurvenabschnitt bei  $H = 0$  beginnend nennt man die Neukurve (NK). Die Magnetisierung  $J$  geht bei sehr hohen Feldstärken in den Sättigungswert  $J_s$  über. Die zur Sättigung eines Ferro- oder Ferrimagnetikums notwendige Stärke des äußeren Feldes ist weitgehend materialspezifisch und kann für diagnostische Zwecke verwendet werden. Die bei der Sättigung maximal erreichbare Magnetisierung nennt man Sättigungsmagnetisierung  $J_s$  (Soffel, 1991).

Verringert man bei der Hystereseschleife vom Zustand der Sättigung ausgehend das äußere Feld, so erhält man keinen reversiblen Verlauf der Magnetisierung entsprechend der Neukurve. Vielmehr verläuft der rückläufige Ast oberhalb der Neukurve mit einer durchwegs geringeren Steigung. Bei  $H_a = 0$  verbleibt eine Restmagnetisierung zurück, welche als Remanenz  $J_r$  bezeichnet wird, bzw. im Falle einer vorhergehenden Sättigung als Sättigungsremanenz  $J_{rs}$  (Soffel, 1991).

Um zur Magnetisierung  $J = 0$  zu gelangen, muss ein zur ursprünglichen Feldrichtung antiparalleles Gegenfeld angelegt werden. Dieses Feld nennt man die Koerzitivfeldstärke oder Koerzitivkraft  $H_c$ . Eine weitere Steigerung der Stärke des Feldes in der Gegenrichtung führt wieder in den Zustand der Sättigung ( $J = -J_s$ ). Reduziert man das Feld wieder auf null, so wird wiederum eine Remanenz  $J_r$  - dieses Mal in Gegenrichtung erzeugt (Soffel, 1991).

Als Remanenzkoerzitivkraft  $H_{cr}$  wird die Stärke jenes Gegenfeldes bezeichnet, welches bei einer vollständigen Reduktion des äußeren Feldes zum Erreichen des Wertes 0 für die remanente Magnetisierung  $J_r$  benötigt wird (Soffel, 1991).

## 2.4 Magnetische Korngröße

Da die Natur immer das Bestreben hat, die magnetischen Partikel in einem Zustand möglichst geringer innerer Energie bzw. Domänenaufteilung zu halten, kann dies bei Ferromagnetika dadurch erreicht werden, dass sich die Teilchen in Subvolumina (Weiß'sche Bezirke) unterteilen (Abbildung 10). Die Magnetisierungsrichtungen unterscheiden sich zwar, jedoch liegen sie stets in Richtung leichtester Magnetisierbarkeit (Soffel, 1991).

Die Übergangszonen zwischen zwei unterschiedlich magnetisierten Bereichen nennt man „Wände“. Im Regelfall strebt ein ferromagnetisches Material für jede Korngröße eine optimale Bereichsaufteilung an, mit einer optimalen Anzahl  $n_{\text{opt}}$  von Wänden zur Minimierung der Energie (Soffel, 1991).

Unterhalb eines kritischen Durchmessers  $d_{\text{krit}}$ , der im Wesentlichen von der Sättigungsmagnetisierung und der Wandenergie bestimmt wird, bringt eine Bereichsaufteilung keine energetischen Vorteile mehr, insbesondere dann nicht, wenn der Teilchendurchmesser selbst etwa der Größenordnung der Wanddicke (ca.  $0.1 \mu\text{m}$ ) entspricht. Eine Bereichsaufteilung unterbleibt dann und solche Teilchen nennt man Einbereichsteilchen (SD-Teilchen; single-domain-Teilchen). Teilchen mit mehreren Bereichen nennt man Mehrbereichsteilchen (MD-Teilchen; multi-domain-Teilchen). Unter Pseudo-Einbereichsteilchen (PSD-Teilchen) versteht man Teilchen mit nur wenigen Bereichen ( $n=2$  bis  $n=8$ ). Diese zeigen magnetische Eigenschaften, welche zwischen den Einbereichsteilchen und den großen Mehrbereichsteilchen liegen (Soffel, 1991).

Entscheidend für das magnetische Verhalten ist weiters das Gleichgewicht zwischen thermischer und magnetischer Energie, welches sich aufgrund der Anordnung bzw. Umordnung von magnetischen Domänen einstellt. Bei sehr kleinen Korndurchmessern ( $< 0,03 \mu\text{m}$ ) dominiert die thermische über die magnetische Energie. Diese Teilchen werden als SP-Teilchen (superparamagnetic-grains) bezeichnet, da sie sich in niedrigen Feldern wie Paramagnetika verhalten, aber viel stärkere Magnetisierungen besitzen (Maher et al., 1999).

# 3 Methodik

Die Gliederung dieses Kapitels bezieht sich auf die chronologische Abfolge der Arbeiten. Der erste Teil der Geländearbeiten sowie der erste Teil der Laborarbeiten dienen der Auswahl der genauen Lage der Bodenprobenentnahmepunkte.

## **3.1 Geländearbeiten Teil 1**

### **3.1.1 Insitu-Feldmessungen**

Um eine rasche und flächendeckende Vermessung des rund 16 km<sup>2</sup> großen Arbeitsareals zu gewährleisten, wurden die Messpunkte in einem 250 m x 250 m Raster angelegt. Das Raster wurde mit Hilfe einer Basiskarte ausgewählt. Mittels Garmin GPS konnten die Positionen der Messpunkte ermittelt werden. Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen wurde ausschließlich an Waldböden gemessen.

Es wurde die Volumenssuszeptibilität mit Hilfe eines Bartington-MS2D-Sensors ermittelt. Hierbei handelt es sich um ein zerstörungsfreies Messverfahren. An jedem Messpunkt wurde zuerst eine Nullmessung in Luft durchgeführt, um eine Driftkorrektur möglich zu machen. Im nächsten Schritt wurden je 10 Messungen in einem Umkreis von 2 m<sup>2</sup> durchgeführt. Später konnte daraus der Median berechnet werden und so anfallende Ausreißer eliminiert werden.

Die jeweiligen Messpunktkoordinaten sowie die Beschreibung der unmittelbaren Umgebung und die ermittelten Werte wurden im Feldbuch notiert und später elektronisch verarbeitet.

Nach jedem abgeschlossenen Messvorgang wurde je eine Bodenprobe der obersten Bodenschicht in einem 20 ml Behälter entnommen und bis zur Messung tiefgekühlt, um die Zersetzung von organischen Substanzen zu vermeiden.

### **Bartington-MS2D-Sensor**

Das Bartington MS2 Messsystem dient der Ermittlung der magnetischen Suszeptibilität. Es besteht aus einem eigentlichen Messgerät und einer Vielzahl von Sensoren, die Böden und Gesteine sowohl im Feld als auch im Labor messen

können. Beim Bartington-MS2 Messgerät besteht die Möglichkeit, die Messung in SI ( $10^{-5}$ ) oder in cgs ( $10^{-6}$ ) Einheiten durchzuführen.

Alle Sensoren arbeiten nach dem Induktionsprinzip. Dabei wird Strom in eine Oszillationsspule innerhalb des jeweiligen Sensors geschickt. Die Spule erzeugt ein magnetisches Wechselfeld niedriger Intensität. Jedes Material, welches im Einfluss des Feldes steht, verändert die Frequenz der Schwingungen. Die Frequenzinformation geht als Pulssignal zurück zum Messgerät und wird dort in einen Suszeptibilitätswert umgewandelt.

Um eine flächendeckende Messung der Volumensuszeptibilität durchzuführen, verwendet man den MS2D-Sensor (Abbildung 11). Während des Messvorgangs wird der Sensor mit gleichmäßigem Druck an die Bodenoberfläche aufgebracht. Die Wiederholpräzision ist von der Gleichmäßigkeit des vermessenen Bodenoberflächenbereichs abhängig (Maier, 2002). Laut Bartington Operation Manual liegt die maximale Eindringtiefe bei ca. 60 mm (50% bei 15 mm; 10% bei 60 mm). Das beste Messergebnis erhält man, wenn die Oberfläche plan und kaum bewachsen ist.



### Garmin GPS

Zur Bestimmung der genauen Position wurde ein GARMIN E-TREX GPS verwendet. Die Genauigkeit der Punkte lag zwischen 5 und 10 Meter, je nachdem, ob man sich im dichten Jungwald oder im Hochwald aufgehalten hat. Die gespeicherten Positionsdaten wurden mittels Firmensoftware auf den PC übertragen. Zur Sicherheit wurden die Koordinaten auch in das Feldprotokoll übertragen.

**Abbildung 11:** Feldmessung mit dem Bartington MS2D-Sensor

## 3.2 Laborarbeiten Teil 1

Der erste Teil der Laborarbeiten wurde an den tiefgefrorenen Bodenproben im Petrophysiklabor des Lehrstuhls für Geophysik in Leoben und an den getrockneten Proben im Paläomagnetiklabor in Gams durchgeführt.

### 3.2.1 Bestimmung der spezifischen Suszeptibilität und Frequenzabhängigkeit

Die Bestimmung der Massensuszeptibilität wurde mit Hilfe des Bartington MS2B-Sensors (Abbildung 12) im Petrophysiklabor durchgeführt. Die Behälter, in denen sich die gefrorenen Bodenproben befanden, konnten direkt in das Messsystem eingebracht werden. Gleichzeitig konnte auch die Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität an den Proben bestimmt werden.



Die Frequenzabhängigkeit wurde durch je zwei Messvorgänge im Hochfrequenzmodus (4,65 kHz) bzw. im Niedrigfrequenzmodus (0,465 kHz) bestimmt. Zur Bestimmung der Frequenzabhängigkeit diente folgende Formel:

$$\chi_{FD}\% = 100 \times ((\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF})$$

$\chi_{LF}$ ... low frequency susceptibility

$\chi_{HF}$ ... high frequency susceptibility

**Abbildung 12:** Bartington MS2B Sensor.

Feines Material ist besonders dann frequenzabhängig, wenn es sich um SD- und SP-Teilchen handelt, da in dieser Größenordnung bereits relativ geringe Veränderungen sich sehr stark auf die Frequenzabhängigkeit auswirken (Bartington Operation Manual).

Hingegen ist die Suszeptibilität relativ grobkörniger Phasen, welche ihren Ursprung z.B. in industriellen Prozessen haben, frequenzunabhängig. Die Kenntnis der Frequenzabhängigkeit FD (%) ermöglicht somit eine allgemeine Abgrenzung

zwischen geogenen ( $FD > 8\%$ ) und anthropogenen magnetischen Phasen in Böden (Scholger & Hanesch, 2000).

### **3.2.2 Bestimmung der Masse und des Wassergehaltes der Probe**

Alle Proben wurden feucht gewogen und an der Luft getrocknet. Nach ca. 5 Tagen wurde die Trockenmasse bestimmt.

### **3.2.3 Magnetische Sättigung, Sättigungsremanenz SIRM**

Alle Proben wurden in einem Gleichfeld von 2,5 T mit Hilfe eines Puls Magnetizer der Firma „2G Enterprise“ gesättigt.

Wird eine Probe im Labor einem starken magnetischen Gleichfeld ausgesetzt, entsteht in der Probe eine entsprechende Remanenz (IRM; Isothermale Remanente Magnetisierung). Mit zunehmender Feldstärke nimmt auch die IRM zu, bis aufgrund der magnetischen Mineralogie keine weitere Steigerung mehr möglich und die magnetische Sättigung (SIRM) erreicht ist. Ferrimagnetische Minerale wie zum Beispiel Magnetit und Maghämite sind bei Feldstärken in der Größenordnung von 300 mT vollständig gesättigt. Antiferromagnetische Minerale (z.B.: Hämatit) und ferromagnetische Minerale (z.B.: Goethit) benötigen dafür Feldstärken von mehr als 2,5 T, entsprechend dem 50.000-fachen Erdmagnetfeld. Wird die Probe anschließend einem entgegengesetzt gerichteten Feld ausgesetzt, folgt die Magnetisierung einer Hysteresisschleife, wobei im allgemeinen relativ geringe Feldstärken genügen, um die Probe vom Zustand der Sättigung auf einen Zustand völliger Abmagnetisierung zu bringen. Sättigungsremanenz (SIRM) und Form der Hysteresisschleife sind von der Korngröße weitgehend unbeeinflusst und geben Hinweise auf die Konzentration und Art der magnetischen Minerale in der Probe (Hemetsberger & Scholger, 2005; Verosub & Roberts, 1995).

### 3.3 Geländearbeiten Teil 2

Unter Zuhilfenahme einer HUMAX Schlagsonde (Abbildung 13) wurden an ausgewählten Beprobungspunkten Bodenkerne entnommen. Die Länge der Bodenkerne betrug 30 cm und der Durchmesser 35 mm. Um den Bohrkern entnehmen zu können, wird die Sonde mit einer auf diesen Durchmesser kalibrierten PVC Hülse befüllt. Das Ergebnis der Probennahme ist ein Bodenprofil wie Abbildung 14.



**Abbildung 13:** HUMAX Schlagsonde mit einem Durchmesser von 35mm (aus <http://www.humax.ch/produkte/handsondensch/index.php>).



**Abbildung 14:** Bodenprofil HP7.

### 3.4 Laborarbeiten Teil 2

#### 3.4.1 Bestimmung der Suszeptibilität

An den Proben wurde die Änderung der magnetischen Suszeptibilität mit der Tiefe gemessen. Die Messung der Volumensuszeptibilität erfolgte mittels Bartington MS2C Sensor (Abbildung 15), welcher für die Messung von Sedimenten oder Bodenproben in einem Plastik-Mantel oder einem anderen unmagnetischen Material geeignet ist (Bartington Operation Manual). Für diese Messungen wurde ein MS2C Sensor mit einem Durchmesser von 60 mm verwendet.



**Abbildung 15:** Bartington MS2C Sensor (aus Bartington Operation Manual).

Wichtig hierbei ist eine Durchmesserkorrektur (Abbildung 16) sowie eine End-of-Core-Korrektur (Abbildung 17; Tabelle 5) (Bartington Operation Manual; Hemetsberger, 2002).

Der „End of Core“- Effekt muss deshalb berücksichtigt werden, weil das Signal des C-Sensors über eine bestimmte Länge integriert wird und das Messsignal am Kernende dann zu einem Teil von der Luft stammt. Um diesen „End of Core“- Effekt quantifizieren zu können, hat Hemetsberger (2002) eine Testmessung an einem mit homogenem Material gefüllten Kern durchgeführt. Wie aus Abbildung 17 ersichtlich, werden am Ende des Kerns nur mehr 50% der tatsächlichen Suszeptibilität registriert. Das volle Signal wird 4 cm vor und nach dem Ende des Kernes registriert. Die aus der Testmessung ermittelten Normierungsfaktoren sind in Tabelle 5 dargestellt (Hemetsberger, 2002).

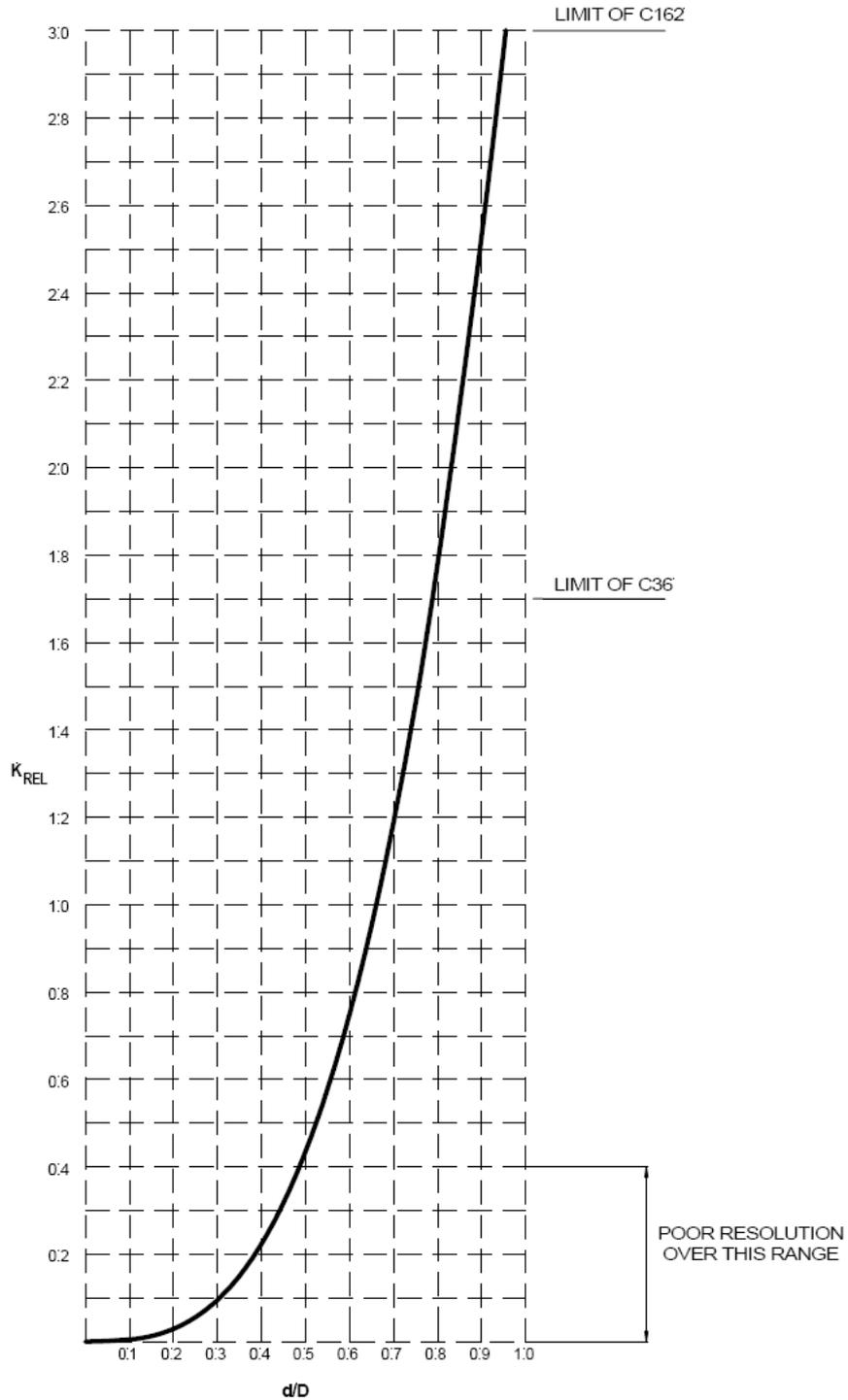
Zuerst erfolgte die Durchmesserkorrektur (Abbildung 16):

$$K_{REL} = 3,45 + (d/D)^3$$

d...Kerndurchmesser (hier 35 mm)

D...Durchmesser des MS2C Sensors + 8mm (hier 60 + 8 mm)

Im Anschluss an die Durchmesserkorrektur wurde der „End-of-Core“- Effekt für jeweils den Anfang und das Ende einer Bodenprobe berechnet (Tabelle 5).



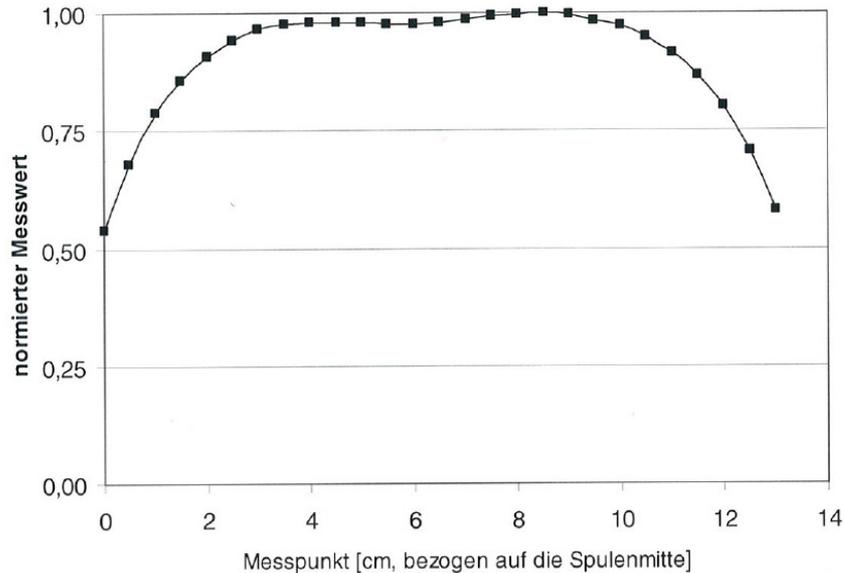
The relative response is given by:

$$K_{REL} = 3.45(d/D)^3$$

Where d = CORE MATERIAL DIAMETER  
 D = MS2C APERTURE DIAMETER +8mm

RELATIVE RESPONSE TO VARYING CORE DIAMETER WITHIN MS2C SENSOR DR0643 (6)

**Abbildung 16:** Durchmesserkorrektur (aus Bartington Operating Manual).



**Abbildung 17:** „End of Core“- Effekt, gültig für Bartington MS2C Sensor (aus Hemetsberger, 2002).

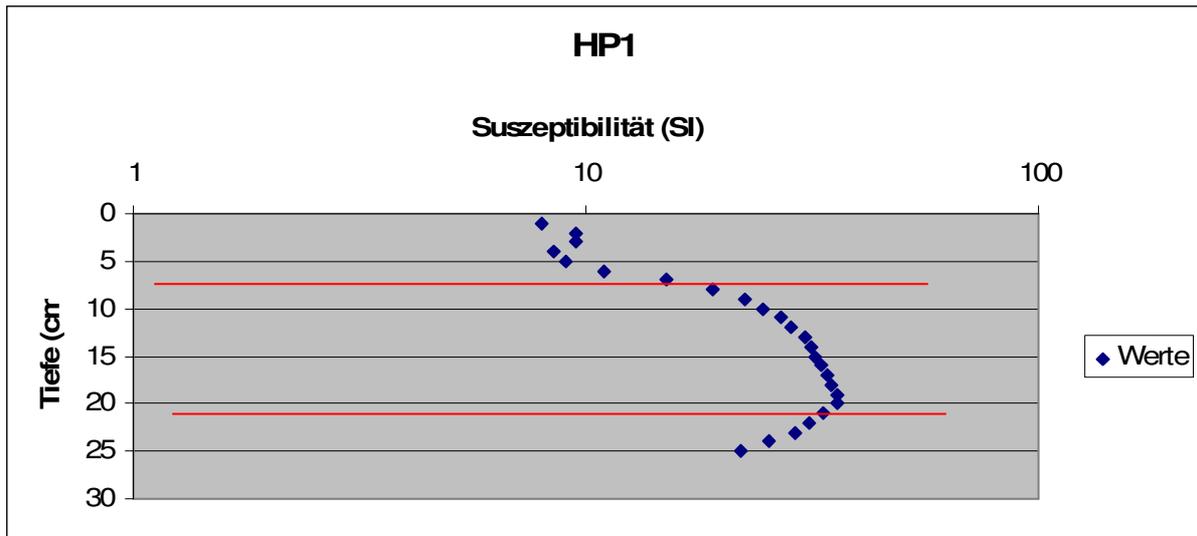
0 cm	54%
1 cm	79%
2 cm	91%
3 cm	97%

**Tabelle 5:** Normierungsfaktoren für den „End of Core“- Effekt (aus Hemetsberger, 2002).

### 3.4.2 Zerteilung der Bodenprofile

Für die Zerteilung der Bodenproben wurde die Tiefenänderung der Suszeptibilität herangezogen. Die Zerteilung wurde immer an den Stellen vorgenommen, wo sich eine markante Suszeptibilitätsänderung ergab (Abbildung 18). Alle Horizonte wurden danach von oben nach unten mit den Zahlen 1 bis 4 (abhängig von der Anzahl der Horizonte) gekennzeichnet.

Die Bodenproben, welche sich nach Entnahme in der PVC Hülse befanden (Abbildung 19), wurden zuerst von dieser befreit (Abbildung 20) und danach in die vorgesehenen Tiefenstufen zerteilt (Abbildung 21) und getrocknet.



**Abbildung 18:** Unterteilung der Bodenproben in 3 bis 4 Tiefenstufen.



**Abbildung 19:** Bodenprobe HP7 in einer Plastikhülle.



**Abbildung 20:** Bodenprobe ohne Hülle.



**Abbildung 21:** Zerteilung der Bodenprobe entsprechend der Änderung der Suszeptibilität mit der Tiefe.

### 3.4.3 Sieben

Alle Proben wurden nach dem Trocknen zuerst halbiert, ein Teil als Originalprobe zurückgestellt, der andere mit einem 2 mm Sieb gesiebt und anschließend als Fraktion < 2 mm und > 2 mm aufbewahrt.

### 3.4.4 Mahlen

Gemahlt wurden die Proben mit einer Achatmühle am Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenkunde der Montanuniversität Leoben. Von jeder Probe wurden rund 30 g der Fraktion < 2 mm je 15 Minuten lang gemahlen.

### 3.4.5 Chemische Analyse

Die chemische Analyse wurde am Institut für allgemeine und analytische Chemie an der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Um einen Überblick über die Verteilung der Schwermetalle im Arbeitsgebiet zu erhalten, wurde eine Röntgenfluoreszenzanalyse durchgeführt. Sie ist eine der häufigsten Methoden für eine quantitative und qualitative Analyse. Die Hauptgründe für die zunehmende Beliebtheit dieser Methode sind die Einfachheit der Röntgenspektren, der geringe Zeitaufwand für die Analyse und Auswertung, sowie die hohe Genauigkeit der erzielbaren Ergebnisse (Püschel, 1965).

Je 4 g Probe und 10 g Wachs wurden in Polystyrolbehälter eingewogen und mit Hilfe einer Kugelmühle bei 15 Hz 2 Minuten lang durchmischt. Danach wurden Wachspresslinge für das Analysengerät angefertigt. Der Analyse diente das Programm Pro Trace Geo.

### 3.4.6 Magnetseparation

Durchgeführt wurde die Magnetseparation im Petrophysiklabor der Montanuniversität Leoben. Die Separation dient dazu, die Hauptmagnetisierungsträger herauszufiltern, um diese später einer elektronenmikroskopischen Analyse zu unterziehen.

Für die Separation wurden 0,5 g der Fraktion < 2 mm eingewogen, die Suszeptibilität gemessen und danach mit destilliertem Wasser in einem Becherglas in Lösung gebracht. Zum Aufrühren des Materials wurde ein Plastiklöffel verwendet. Zur Abtrennung der magnetischen Fraktion diente ein starker Permanentmagnet, der an das Becherglas angelegt wurde. Durch das ständige, vorsichtige Rühren heften sich die magnetischen Komponenten an die Becherglaswand an. Diese konnten dann mit Hilfe eines Stabmagneten aus der Lösung geholt und in einen Plastikbecher gegeben werden. Das restliche Material wurde getrocknet, damit dann nochmals die Suszeptibilität bestimmt werden konnte. Diese Messung diente zu Kontrolle, ob auch tatsächlich ein Großteil des magnetischen Materials entfernt wurde.

### 3.4.7 Röntgendiffraktometrie

Um einen Überblick über die Mineralzusammensetzung der Bodenproben zu erhalten, wurde eine Röntgendiffraktometrie durchgeführt. Diese diente hauptsächlich dazu, die unterschiedlichen Eisenminerale zu bestimmen. Drei Erzproben wurden als Vergleichsproben mitanalysiert. Hierbei handelte es sich um Proben aus dem Eisernen Hut, wobei die eine Probe aus dem untersten Teil, also direkt angrenzend an den Siderit stammt, und die andere aus dem obersten Teil, also dem am stärksten verwitterten Teil des Eisernen Hutes. Bei der dritten Probe handelte es sich um Manganknollen, welche in einer Kluft auskristallisiert wurden.

Grundlage der Röntgendiffraktometrie ist die Beugung von Röntgenstrahlung an geordneten Strukturen wie Kristallen oder Quasikristallen. Die Bragg-Gleichung ist die zugrunde liegende mathematische Beziehung für die Ermittlung der Struktur aus dem bei der Röntgenbeugung erhaltenen Beugungsbild:

$$N \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \varphi \quad (\text{Gleichung 7})$$

Dabei ist  $\lambda$  die Wellenlänge des monochromatischen Röntgenstrahls, mit dem man die Probe bestrahlt,  $d$  der Abstand der Netzebenen,  $\theta$  der Winkel, unter dem die Strahlung auf die Netzebene auftrifft und  $N$  eine ganze Zahl.

Die Proben wurden unbehandelt mit Hilfe eines Philips Röntgendiffraktometer, bestehend aus einem PW 1830/40 Generator, einem PW 3020/00 Goniometer und einer PW 2213/20 Cu Röntgenröhre, analysiert.

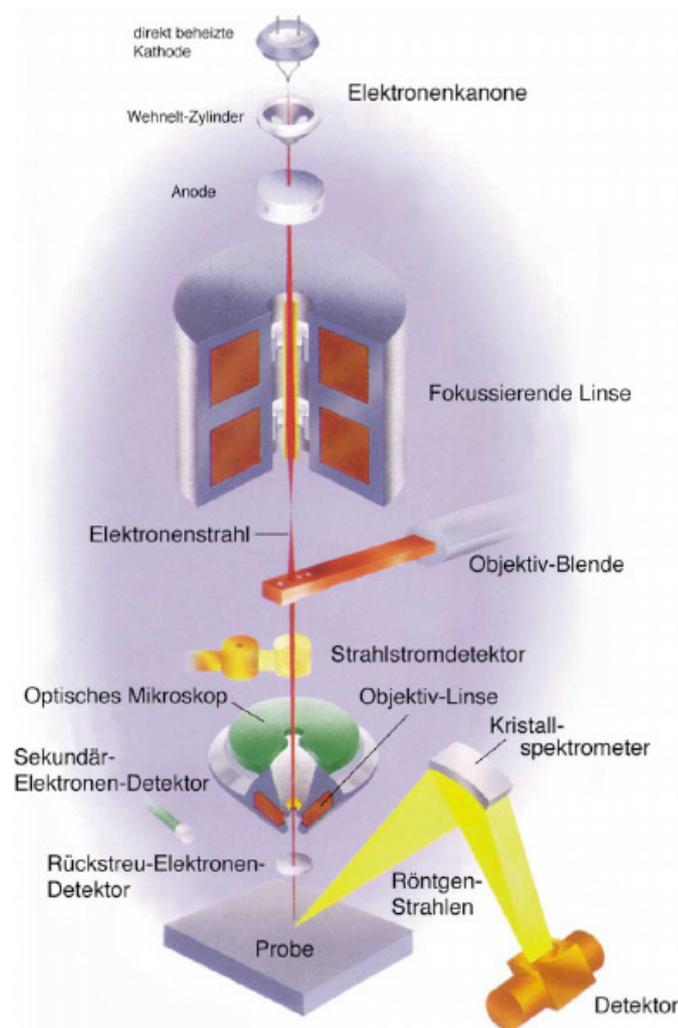
### **3.4.8 Mikrosonde**

Die Mikrosonde JEOL JXA-8200 ist eine Kombination aus Lichtmikroskop, Rasterelektronenmikroskop und Röntgenspektralanalysator. Durch Elektronenbeschuss werden auf der Probe Röntgenstrahlen mit jeweils elementtypischen Wellenlängen bzw. Energie freigesetzt. Bei der wellenlängendispersiven Analyse werden die gewünschten Wellenlängen mit Hilfe eines Analysatorkristalls herausgefiltert und auf die Zähler reflektiert (<http://www.geocities.com/capecanaveral/launchpad/1008/mikrosonde.html>).

Die Vorteile dieser Untersuchungsmethode sind:

- Mineralkörner können im Gesteinsverband analysiert werden
- Es wird nur eine geringe Probenmenge (ein Mineralkorn) benötigt
- Variationen im Chemismus eines Mineralkorns können quantitativ erfasst werden.

Die Anregung der charakteristischen Röntgenstrahlung der Elemente erfolgt durch einen fein fokussierten Elektronenstrahl, der mittels eines elektronischen Linsensystems auf einen Durchmesser von wenigen  $\mu\text{m}$  gebündelt werden kann. In dem von dem Elektronenstrahl getroffenen Punkt auf einem Mineralkorn wird ein Teil des charakteristischen Röntgenspektrums der in dem Mineral vorhandenen Elemente angeregt. Die Strahlung wird wellenlängendispersiv in Kristallspektrometern oder energiedispersiv mittels Halbleiterdetektoren analysiert (Abbildung 22) (<http://www.uni-koeln.de/math-nat-fak/mineral/museum/5-Sonde.pdf>).



**Abbildung 22:** Schematische Aufbau einer Elektronenstrahlmikrosonde (<http://www.uni-koeln.de/math-nat-fak/mineral/museum/5-Sonde.pdf>).

### 3.4.8 Raman

Die Raman-Spektroskopie ist eine berührungsfreie Analysenmethode zur Materialcharakterisierung. Mit der Raman-Spektroskopie werden biologische, chemische und pharmazeutische Proben analysiert. Ferner wird sie zur chemischen und physikalischen Charakterisierung von Halbleitern, Edel- und Halbedelsteinen, Katalysatoren, Mineralien, Polymeren und vielen anderen Materialien verwendet (<http://www.raman.de/htmlIDE/home/startDe.html>).

#### Der Raman Effekt

Bestrahlt man Moleküle mit monochromatischem Licht, so wird das eingestrahlte Licht gestreut. Nach Zerlegung des Streulichts zeigen sich neben der intensiven Spektrallinie der Lichtquelle zusätzliche Spektrallinien, die gegenüber der Frequenz

der Lichtquelle verschoben sind. Die letzteren Linien nennt man Raman-Linien. Abbildung 23 zeigt ein Ramanspektrum für das Mineral Geothit.

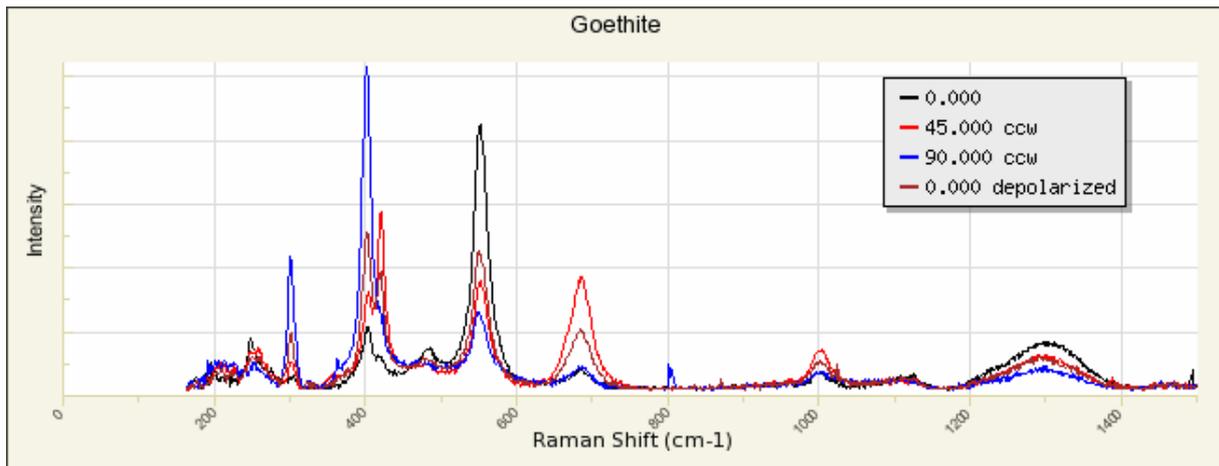
Die Wechselwirkung zwischen Materie und Licht kann als ein Stoßvorgang angesehen werden.

Dabei ergeben sich drei Möglichkeiten (Abbildung 24):

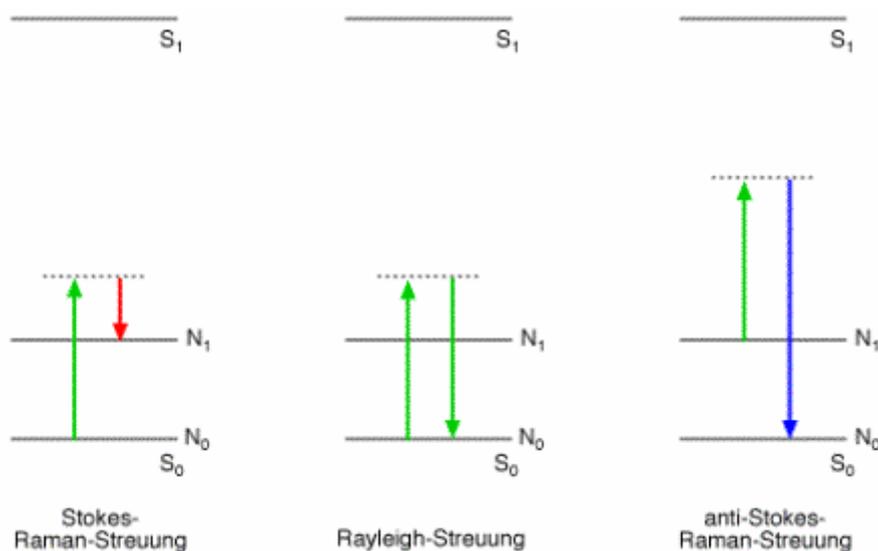
Beim elastischen Stoß eines Photons bestimmter Energie (grüner Pfeil) mit einem Molekül verändert sich der Energiezustand des Moleküls nicht. Auch die Frequenz der Streustrahlung verändert sich nicht zur Frequenz der Lichtquelle. Diese Streuung wird als Rayleigh-Streuung bezeichnet.

Die beiden anderen Möglichkeiten stellen den Raman-Effekt dar, der als unelastischer Stoß zwischen einem Photon und einem Molekül aufgefasst werden kann. Die Energie, die dabei abgegeben oder aufgenommen wird, entspricht der Differenz zwischen zwei Energieniveaus einer Molekülschwingung.

1. Das Molekül besitzt nach dem Stoß eine höhere Schwingungsenergie. Das Streulicht ist dabei energieärmer geworden (roter Pfeil) und weist damit eine geringere Frequenz auf. Die beobachtbaren Spektrallinien werden als Stokes-Linien bezeichnet.
2. Das Molekül besitzt nach dem Stoß eine niedrigere Schwingungsenergie. Die Energie des gestreuten Lichts ist dabei größer geworden (blauer Pfeil) und weist eine höhere Frequenz auf. Die beobachtbaren Spektrallinien werden als Anti-Stokes-Linien bezeichnet. Dieser Fall ist nur möglich, wenn das Molekül vor dem Stoß sich in einem höheren Energiezustand befindet.



**Abbildung 23:** Ramanspektrum eines Goethites (<http://rruff.info/goethite/names/asc/X050091>).



**Abbildung 24:** Darstellung der Arten von Streuung bei der Ramanspektroskopie (<http://www.raman.de/htmlDE/basics/basicDe.html>).

### 3.4.10 Curietemperatur

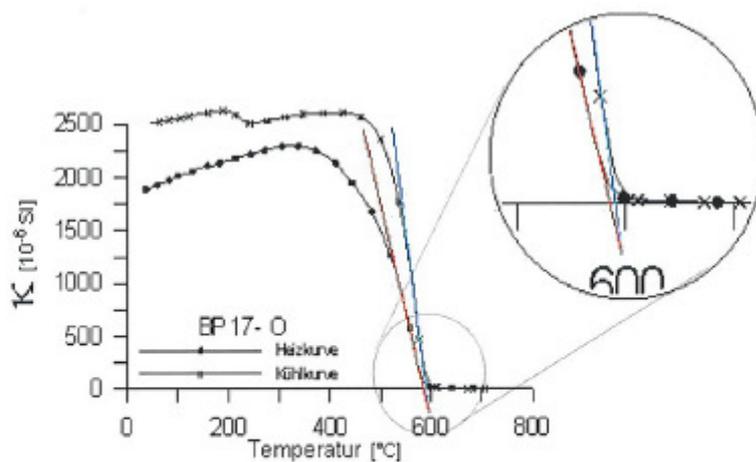
Mit Hilfe der MFK1-FA Kappabridge von AGICO wurde am getrockneten Material der Bodenproben HP4, HP9 und HP10 die thermische Änderung der Anfangssuszeptibilität bis ca. 700 °C (Heiz- und Kühlkurve) aufgezeichnet.

Zur Bestimmung des Curiepunktes wurde die graphische Methode gewählt (Abbildung 25). Wenn man in einem Diagramm die Heiz- und Kühlkurve darstellt und an beide Kurven die Tangente im Punkt der größten Steigung anlegt, geben die

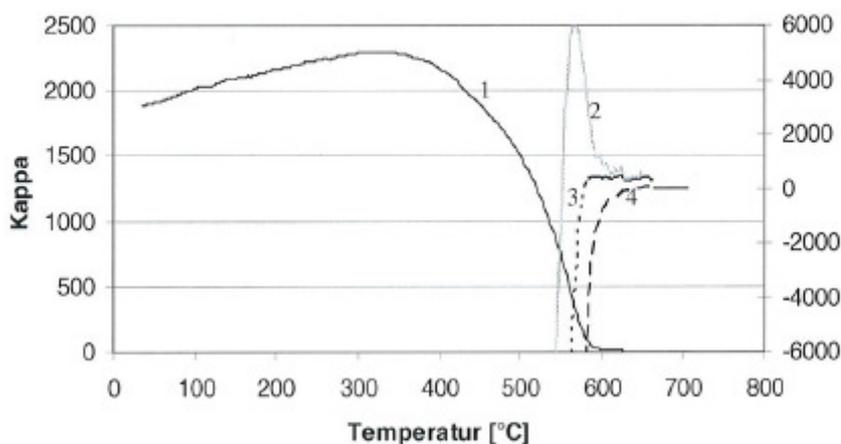
Schnittpunkte der Tangenten mit der Temperaturachse den Bereich an, in dem dann der Curiepunkt der Komponente liegt. Außerdem gibt es noch die physikalische Bestimmungsmethode (Abbildung 26). Diese beruht darauf, dass sich ferromagnetische Minerale oberhalb der Curietemperatur wie Paramagnetika verhalten, was sowohl die Größenordnung als auch die Temperaturabhängigkeit betrifft. Oberhalb von  $T_C$  gehorchen sie dem Weiß'schen Gesetz:

$$k = C / (T - T_C) \quad \text{konstant für ein Mineral.}$$

Mit dieser Formel wird durch iteratives Anpassen des  $T_C$  der richtige Curiepunkt bestimmt (Hemetsberger, 2002).



**Abbildung 25:** Curiepunktbestimmung; graphische Auswertung,  $T_C = 590^\circ\text{C}$  (aus Hemetsberger 2002).



**Abbildung 26:** Curiepunktbestimmung nach physikalischer Definition; 1 Heizkurve; 2  $k = C / (T - T_C)$ ,  $T_C$  zu niedrig gewählt; 3  $k = C / (T - T_C)$ ,  $T_C$  richtig gewählt; 4  $k = C / (T - T_C)$ ,  $T_C$  zu hoch gewählt;  $T_C = 580^\circ\text{C}$  (aus Hemetsberger 2002).

# 4 Ergebnisse

## 4.1 Geländearbeiten Teil 1

### 4.1.1 In Situ-Feldmessungen

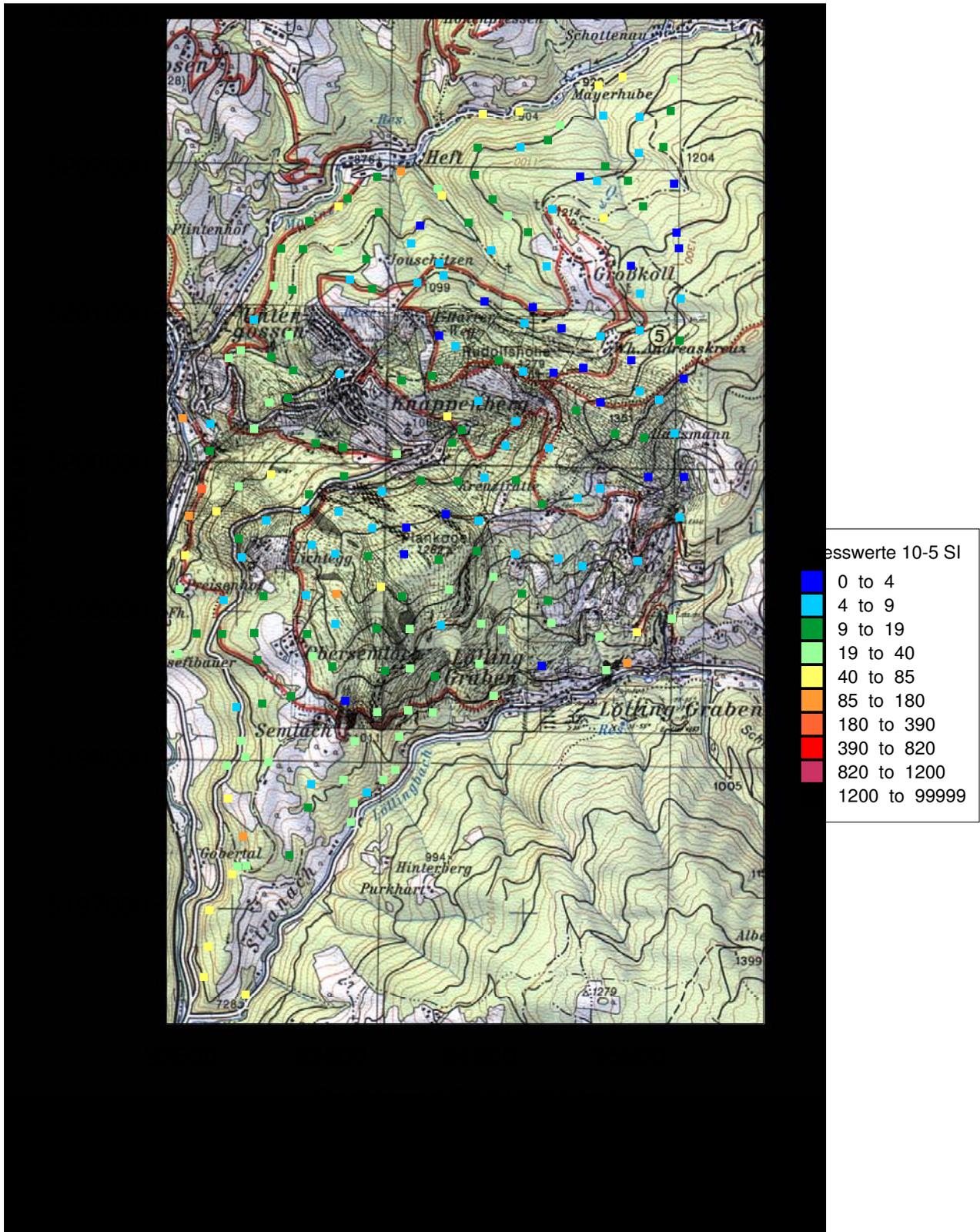
Die Feldmessungen wurden vom 28. April bis 26. Mai 2008 an 214 Punkten ausschließlich an Waldböden durchgeführt (Abbildung 27).

Abbildung 27 zeigt die Suszeptibilitätsverteilung im Arbeitsgebiet. Jeder Punkt in der Karte wurde durch seinen MS2D Messwert einer von 10 Suszeptibilitätsklassen (deren Einteilung nach Hemetsberger (2002) erfolgte) zugewiesen und mit entsprechender Farbkodierung ausgeplottet. Aus Abbildung 27 ist ersichtlich, dass es sich um drei Anomaliezentren handelt. Das erste Zentrum befindet sich entlang der Verbindungsstrasse zwischen Heft und Mosinz. Ihre Ausbreitung ist fast ausschließlich auf den Nahbereich der Straße beschränkt. Die erhöhten Suszeptibilitätswerte treten mehr oder weniger nur im Tal auf. Nahe liegt, dass diese Anomalie auf die Hüttenindustrie zurückzuführen ist, da man entlang dieser Strasse auf Relikte früherer Eisenindustrie stößt.

Die zweite Anomalie befindet sich südlich des Hüttenberger Zentrums. Sie beginnt wenige 100m vom Kulturhaus entfernt und findet ihren Höhepunkt im Bereich des Stollens, welcher sich nur unweit vom ehemaligen Bahnhof befindet. Der Bahnhof diente zu Zeiten des Bergbaus als Transportweg für das Eisenerz. Die erhöhten Werte lassen sich noch einige 100m weiter entlang der Bahnstrecke verfolgen.

Die dritte Anomalie befindet sich am südlichen Rand des Arbeitsgebietes. Sie erstreckt sich auf rund 2km entlang der Straße in Richtung Knappenberg. Im südlichen Teil des Arbeitsgebietes dürfte die Anomalie aber eher geologisch bedingt sein. Diese Vermutung liegt nahe, weil Proben mit erhöhten Werten nicht nur im Tal, sondern auch in höheren Lagen zu finden sind. Außerdem gibt es hier keinen Zusammenhang zwischen früheren Verhüttungszentren oder anstehendem Erz. Aus der geologischen Karte ist erkennbar, dass in diesem Bereich des Arbeitsgebietes eine vollkommen andere Lithologie wie im Rest des Gebietes auftritt.

Zusätzlich zu den drei großen Anomalien gibt es noch vier mehr oder weniger punktuell auftretende Anomalien. Im Bereich von Obersemlach wurde im Gelände ein Erzausbiss beobachtet, welcher für den erhöhten Wert verantwortlich ist. Die Anomalie in Knappenberg befindet sich direkt unterhalb des früheren „Fuchs“-Tagebaus und ist über einer ehemaligen Halde gelegen. Am Großkoll befindet sich am Messpunkt eine kleine Erhöhung, welche möglicherweise einen alten Verhüttungsplatz darstellt. Die letzte Anomalie befindet sich in Lölling. Auch hier fand in früheren Zeiten Verhüttung statt.



**Abbildung 27:** Verteilungskarte der magnetischen Suszeptibilität im Arbeitsgebiet. Klasseneinteilung nach Hemetsberger 2002.

## 4.2 Labormessungen Teil 1

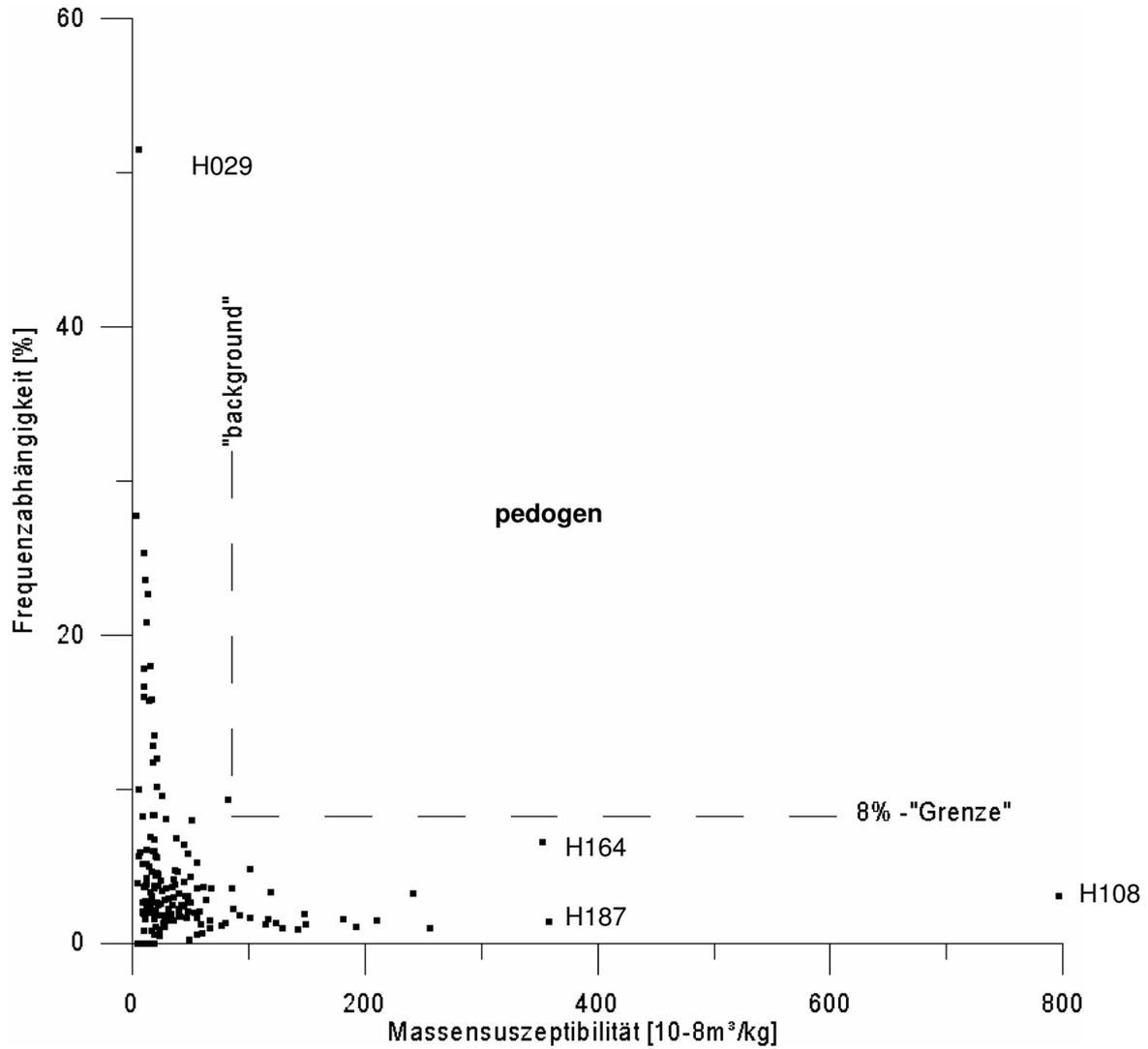
### 4.2.1 spezifische Suszeptibilität, Frequenzabhängigkeit, Volumensuszeptibilität

Proben, die im Bereich niedriger Frequenzabhängigkeit und hoher Suszeptibilität liegen, zeigen eine Dominanz grobkörniger, hochmagnetischer Phasen (z.B.: Probe H108, H187 und H164). Diese Proben weisen einen technogenen Einfluss auf (Abbildung 28). Proben mit hoher Frequenzabhängigkeit und niedriger Suszeptibilität (z.B.: Probe H029) deuten auf einen geogenen Ursprung hin (Maier, 2002) (Abbildung 28). Der Bereich zwischen den Endgliedern stellt eine Mischform aus technogenen und geogenen magnetischen Phasen unterschiedlicher Korngröße dar (Hemetsberger, 2002). Laut Hanesch und Scholger (2005) liegt der Median der Massensuszeptibilität zwischen  $77 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  für Schwarzerde und  $7 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  für Gley. Aus diesem Grund kann man alle Proben mit Massensuszeptibilitäten  $< 80 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  als natürliche Schwankungen ansehen und diese als Background bezeichnen.

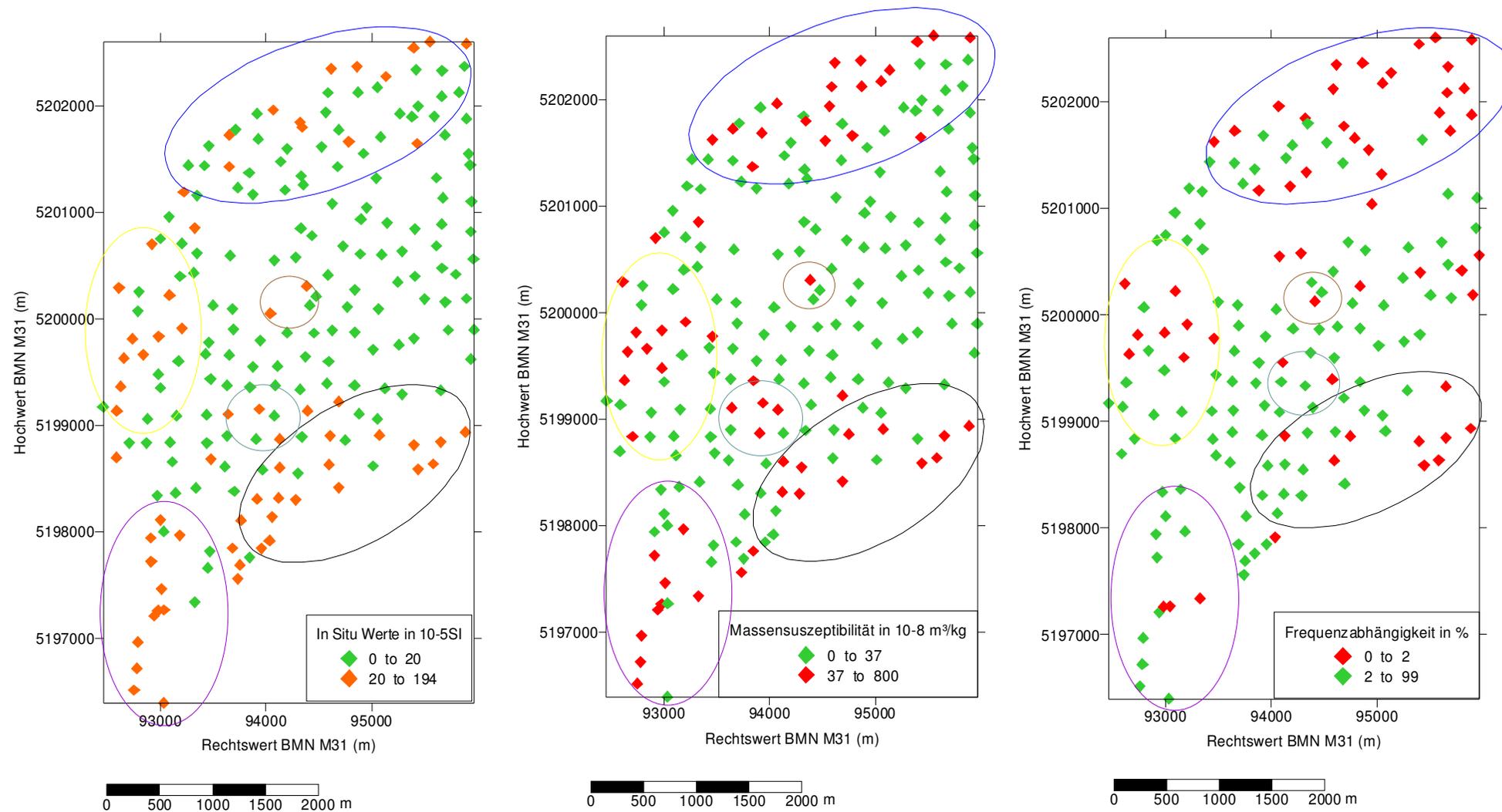
Abbildung 29 stellt eine Gegenüberstellung der spezifischen Suszeptibilität, der Frequenzabhängigkeit und der Volumensuszeptibilität (in situ Werte) dar. Die Wertebereiche wurden so angepasst, dass die Bilder vergleichbar wurden. Aus diesem Grund wurde bei der Frequenzabhängigkeit auch nicht die 8% Schwelle angesetzt, sondern die Grenze bei 2% gezogen. Die Frequenzabhängigkeit FD (%) ermöglicht eine allgemeine Abgrenzung zwischen geogenen (FD > 8%) und anthropogenen magnetischen Phasen in Böden (Scholger & Hanesch, 2000). Bei 8% befanden sich 90% der Messpunkte in einer Klasse. Anhand dieser Gegenüberstellung wurde die Auswahl des bevorzugten Profils für die Bodenproben vorgenommen.

In Abbildung 29 sind vier große Anomaliezentren zu erkennen. Diese befinden sich zwischen Heft und Mosinz, im Bereich Hüttenberg, an der Kreuzung Görtschitztal – Löllinggraben und in Lölling. Durch Vergleiche mit Abbildung 27 ergibt sich eine Übereinstimmung der Anomaliebereiche von Heft – Mosinz, Hüttenberg und der Kreuzung Görtschitztal – Löllinggraben. Die Anomalie in Lölling tritt in Abbildung 29 stärker hervor, weil die Grenzwerte in dieser Abbildung deutlich tiefer liegen als in Abbildung 27. Des Weiteren sind zwei kleinere Anomalien in Semlach bzw. Obersemlach sowie in Knappenberg zu erkennen. Um einen Großteil der Anomalien

für genauere Untersuchungen zu erfassen, wurde ein entsprechendes Nord-Süd-Profil gewählt.



**Abbildung 28:** Massenszeptibilität über die Frequenzabhängigkeit.

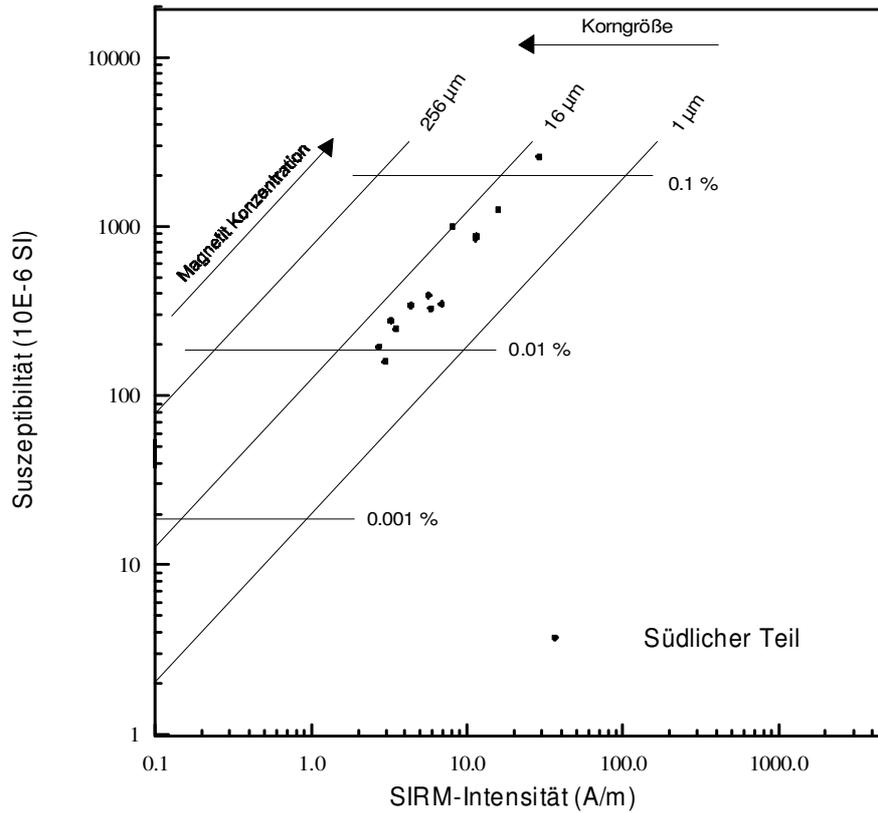


**Abbildung 29:** Massenssuszeptibilität, Frequenzabhängigkeit und in situ Werte (Volumenssuszeptibilität).

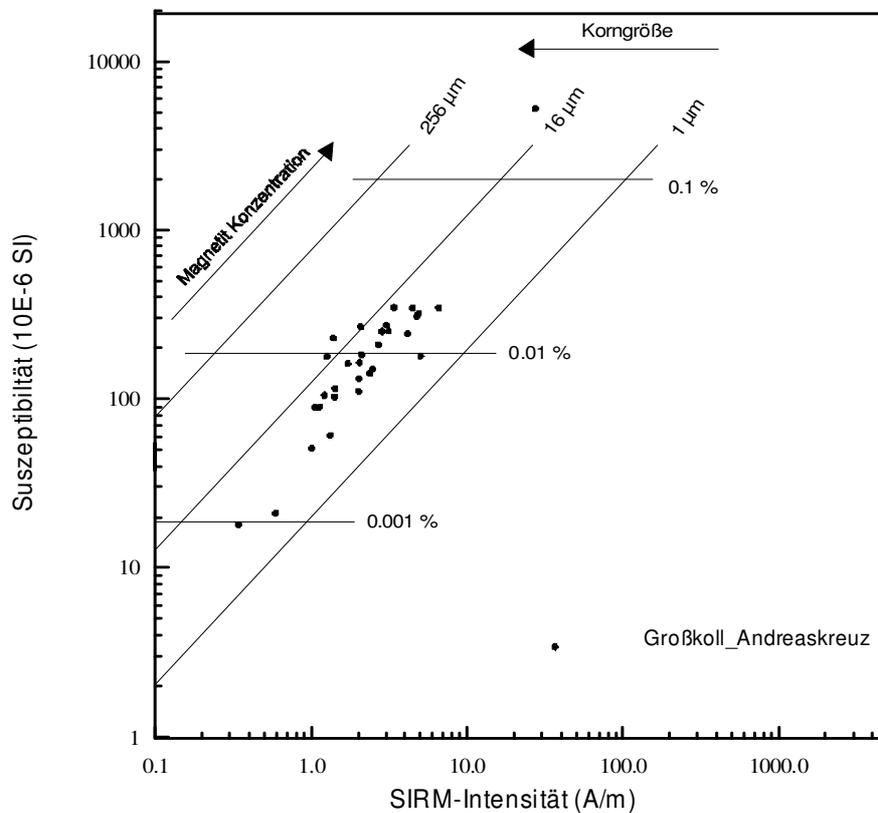
#### 4.2.2 Magnetische Sättigung, Sättigungsremanenz (SIRM)

Im Diagramm nach Thompson & Oldfield (1986) wird die Massensuszeptibilität der Sättigungsremanenz gegenübergestellt.

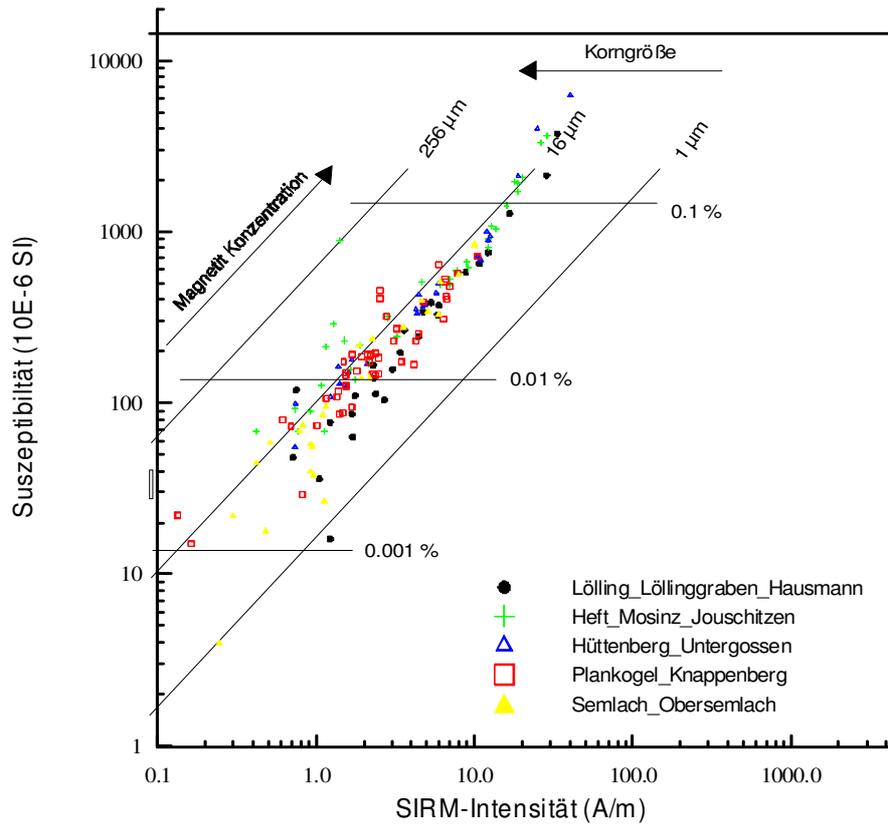
Diese Darstellung erlaubt nicht nur eine Aussage über die magnetischen Korngrößen, sondern auch eine Aussage über die Schwankung der Konzentration magnetischer Trägerminerale. Die Bezeichnung „Magnetit-Konzentration“ steht dabei für eine theoretische Magnetitkonzentration, unter der Annahme, dass der Träger der Magnetisierung ausschließlich aus stöchiometrischem Magnetit besteht. Der Vergleich zwischen Sättigungsremanenz und magnetischer Suszeptibilität sollte somit eine Zuordnung der Proben zu mineralmagnetischen Populationen und weiters eine semiquantitative Abschätzung der Korngröße und Konzentration von Magnetit in den Proben ermöglichen (Thompson & Oldfield, 1986). Da es sich hier um mehr als 200 Proben handelt, wurden nicht alle Proben in einer Abbildung dargestellt. Die Trennung der Proben erfolgte bezogen auf die geographische Lage. In Abbildung 30 sind alle Probenpunkte eingezeichnet, die sich im südlichen Teil des Arbeitsgebietes, an der Kreuzung Görtschitztal – Löllinggraben, befinden. Auffallend ist, dass es kaum eine Schwankung der magnetischen Korngröße gibt, doch weisen diese Proben eine erhöhte theoretische Magnetitkonzentration auf. In Abbildung 31 dagegen gibt es eine größere Streuung der Korngröße. Außerdem sind diese Proben im unteren Bereich der theoretischen Magnetitkonzentration angesiedelt. Aus Abbildung 32 geht hervor, dass die Proben des restlichen Arbeitsgebietes kaum einer Schwankung, weder im Bezug auf die theoretische Magnetitkonzentration noch bezogen auf die magnetische Korngröße, unterliegen.



**Abbildung 30:** Diagramm nach Thompson & Oldfield 1986. Probenpunkte aus dem südl. Teil des Arbeitsgebietes; Kreuzung Görtschitztal – Löllinggraben.



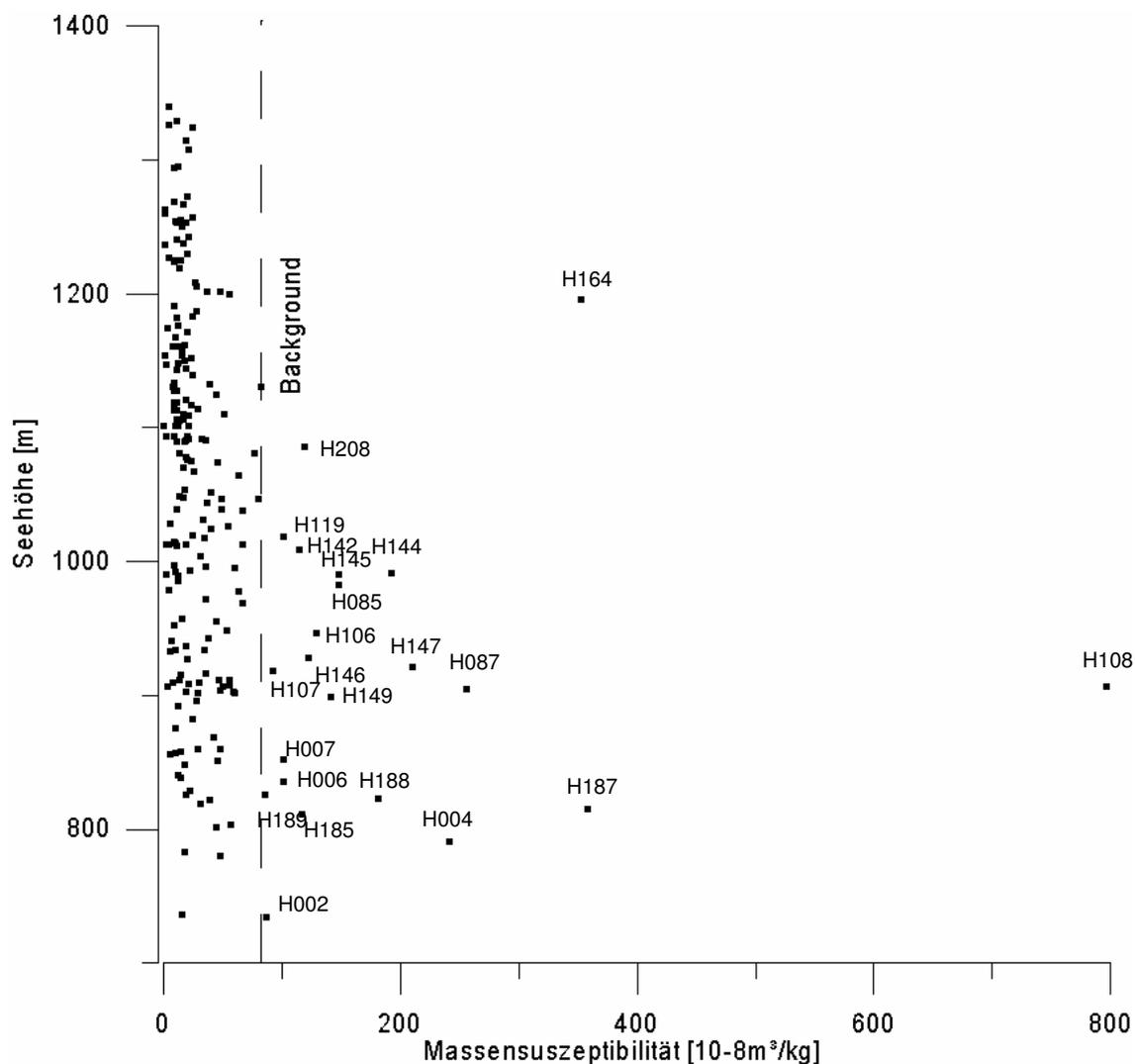
**Abbildung 31:** Diagramm nach Thompson & Oldfield 1986. Probenpunkte am Großkoll und Andreaskreuz.



**Abbildung 32:** Diagramm nach Thompson & Oldfield 1986. Probenpunkte aus Lölling, Löllinggraben, Hausmann, Heft, Mosinz, Jouschitzen, Hüttenberg, Untergossen, Plankogel, Knappenberg, Semlach und Obersemlach.

### 4.2.3 Massenssuszeptibilität gegen Seehöhe

Abbildung 33 zeigt, dass sich die meisten Punkte innerhalb des Backgrounds befinden. Die Grenze zwischen Background und erhöhten Werten wurde wiederum bei  $80 \cdot 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  gezogen (Hanesch & Scholger, 2005). Auffallend sind in diesem Fall aber nur die Punkte, welche sich auf höherer Seehöhe befinden, wie die Proben H164 und H208. Hierbei handelt es sich wieder um den einen Punkt in Knappenberg, welcher sich auf der Halde unterhalb des „Fuchs“-Tagebaus (H164) befindet, und den Punkt im Wald am Großkoll (H208) (Abbildung 27).



**Abbildung 33:** Gegenüberstellung von Massenssuszeptibilität und Seehöhe.

## 4.3 Geländearbeit Teil 2

### 4.3.1 Vertikale Suszeptibilitätsverteilung

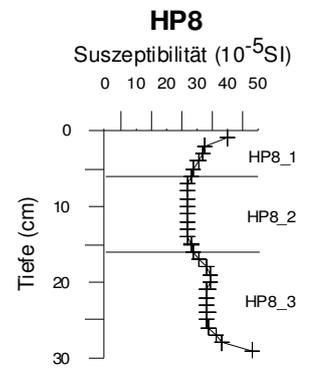
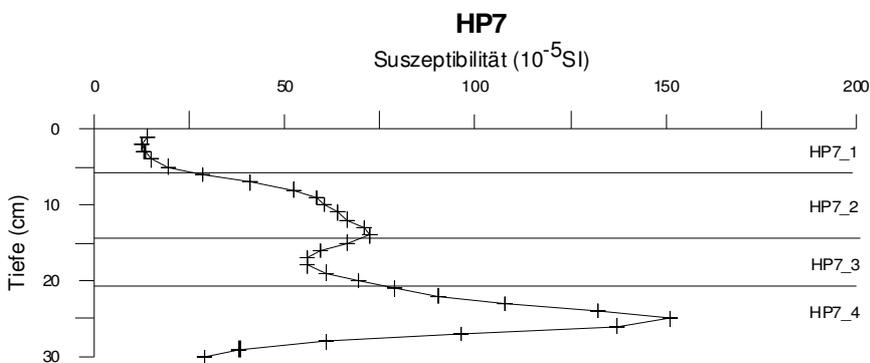
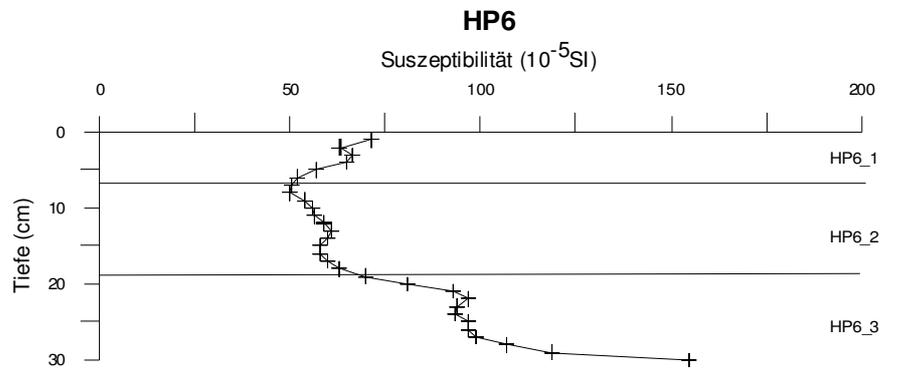
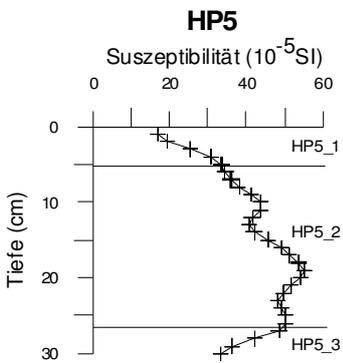
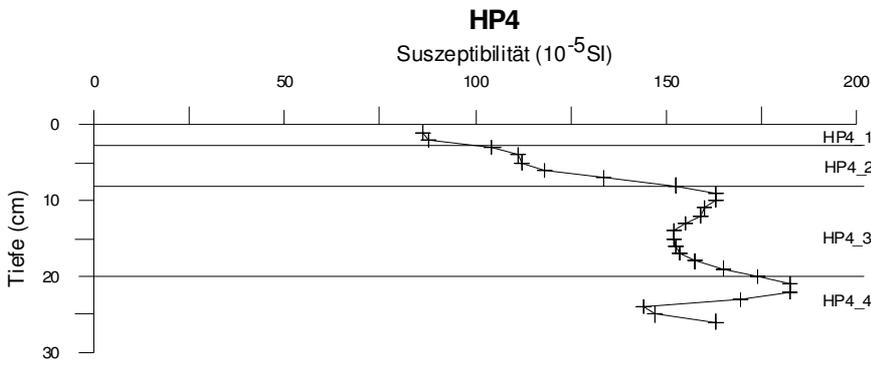
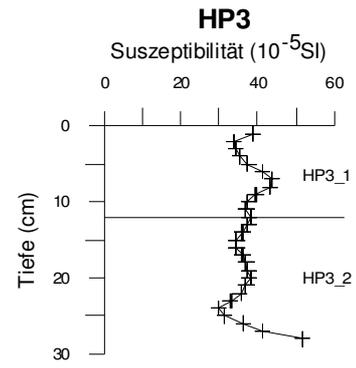
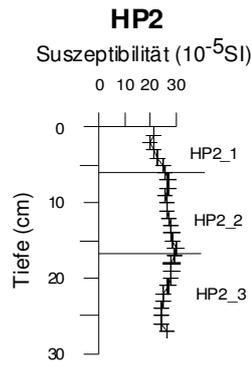
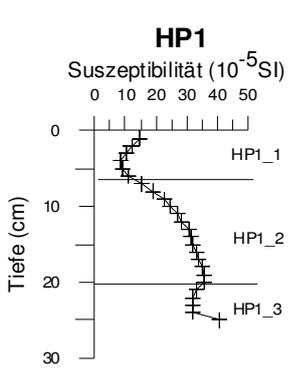
Abbildung 4 und 5 zeigen die Verteilung der Bodenproben im Arbeitsgebiet. Sie wurden von Süden nach Norden quer über das Arbeitsgebiet entnommen.

## 4.4 Laborarbeiten Teil 2

### 4.4.1 Suszeptibilitätsbestimmung

Abbildung 34 zeigt die Suszeptibilitätsverteilung in den Proben HP1 bis HP17. Beispiel einer anthropogen beeinflussten Probe wäre die Bodenprobe HP15. Diese zeigt einen Anstieg der Suszeptibilität innerhalb der ersten 5 cm und danach den sukzessiven Abfall gegen die Tiefe. Ein Beispiel für einen geogen beeinflussten Boden wäre hingegen Probe HP9. Erkennbar ist der stetige Anstieg der Suszeptibilität gegen die Tiefe. Bodenproben HP12 und HP13 weisen sehr geringe Suszeptibilitäten auf, wohingegen Proben HP4 und HP9 sehr hohe Werte besitzen.

In Abbildung 34 sind außerdem die jeweiligen Horizonte gekennzeichnet, die für die weiteren Analysen verwendet wurden. An allen Proben und Horizonten wurden Röntgenfluoreszenzanalysen durchgeführt. Die Proben HP1, HP4, HP6, HP7, HP8, HP9, HP10, HP11 und HP15 wurden vollständig einer Magnetseparation unterzogen und anschließend mit der Mikrosonde analysiert. Eine Röntgendiffraktometrie wurde an den Proben HP4\_3, HP6\_1, HP6\_2, HP6\_3 und HP11\_2 gemacht. An den Proben HP4, HP9 und HP10 wurde jeweils über den gesamten Bereich eine Curiepunktbestimmung durchgeführt.



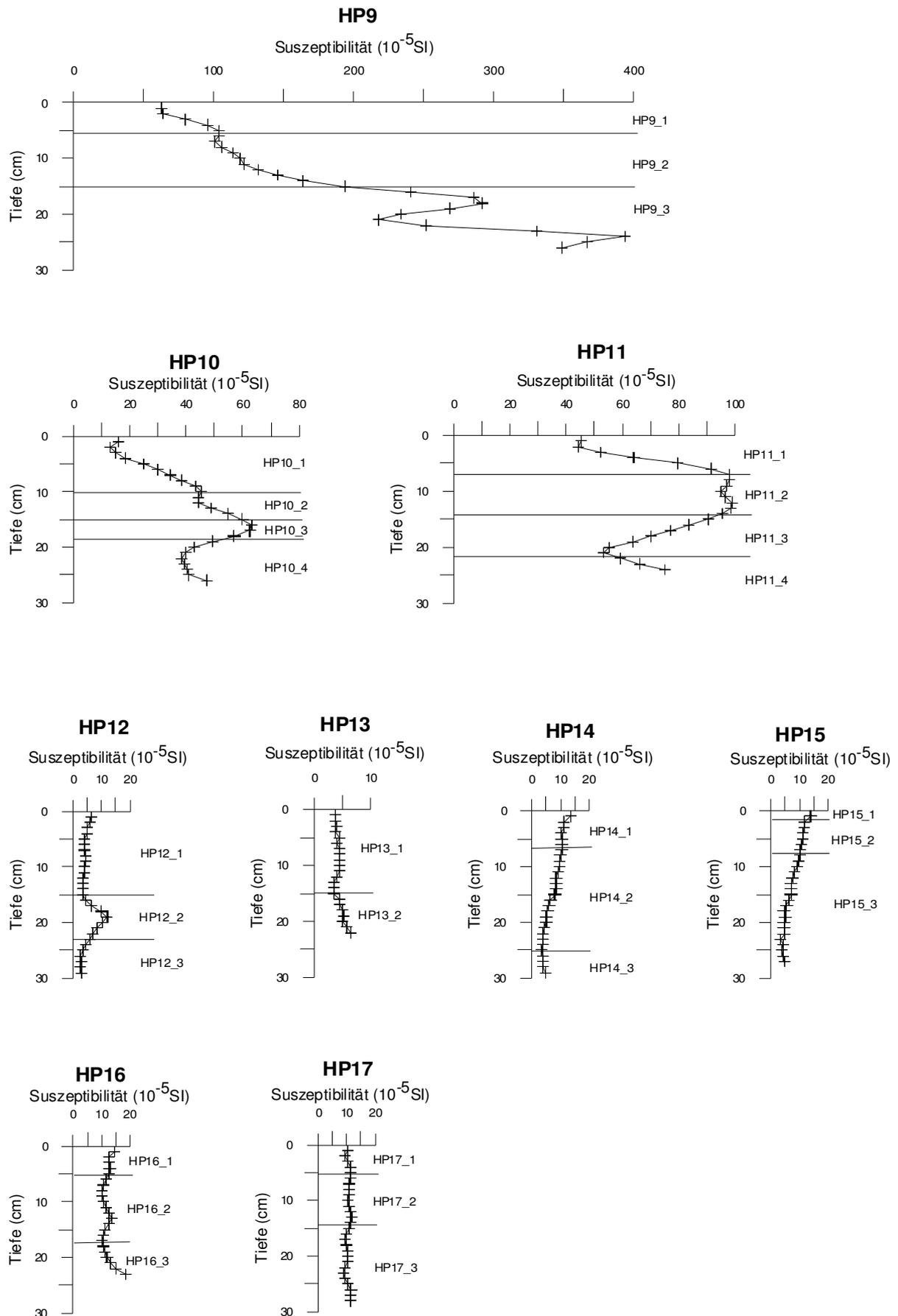


Abbildung 34: Tiefenverteilung der Volumenssuszeptibilität der Bodenproben HP1 bis HP17.

## 4.4.2 Chemische Analyse

### Bodenzustandsinventur

Spätestens seit Beginn der Industrialisierung lässt sich ein über das natürliche Maß hinausgehender Eintrag von Schwermetallen in Böden erkennen. Wesentlich ist, dass Böden im Gegensatz zu Wasser und Luft langjährige Einträge archivieren (Bodenzustandsinventur, 1999). Anthropogen eingetragene Schwermetalle besitzen aufgrund ihrer vorwiegenden Bindungsform als Oxide und Sulfate eine höhere Mobilität und Verfügbarkeit als die im Wesentlichen silikatisch, sulfidisch oder karbonatisch gebundenen, natürlich vorhandenen Schwermetalle.

Tabelle 6 zeigt das Ergebnis der Röntgenfluoreszenzanalyse. Die Abbildungen 35 bis 45 zeigen die Verteilung verschiedener Elemente im Süd-Nord-Profil. Die drei Balken zeigen die Verteilung der Elemente vom Oberboden (linker Balken) bis in den Unterboden (rechter Balken).

Wie Abbildung 35 zeigt, besteht die Probe HP12 zu 80% aus CaO. Diese Probe dürfte über einem nicht kartierten Marmorzug entnommen worden sein.

Strontium ist, wie in Abbildung 36 dargestellt, im Vergleich mit den anderen Bodenproben in Bodenprobe HP12 stark erhöht. Es kommt nicht selten vor, dass Marmore relativ hohe Gehalte an Strontium einbauen (Gao et al., 1998). In der metallogenetischen Karte Österreichs (Abbildung 37) ist ersichtlich, dass die erhöhte Strontiumgehalte auch in den Bachsedimenten von Knappenberg zu finden sind. Das Strontium könnte durch Denudation in den Bach gelangt sein. Abbildung 38 zeigt die Verteilung des As in den Bodenproben. Der Grenzwert für die landwirtschaftliche Nutzung beträgt bei Arsen 20 ppm (Bodenzustandsinventur 1999). Die Proben HP1, Hp4 und HP14 weisen leicht erhöhte Werte auf. Auffallend ist, dass die Punkte HP1 bis HP5, welche sich in der Gurktaler-Decke befinden, durchgehend höhere Werte an Arsen aufweisen als die Bodenproben des restlichen Arbeitsgebietes. Daher liegt die Vermutung nahe, dass es sich hier um eine geologisch bedingte Anomalie handelt. HP9 und HP11 befindet sich über bzw. in unmittelbarer Nähe zum Serpentin.

Kobalt, Chrom und Nickel zeigen alle den gleichen Trend (Abbildungen 39, 40, 41). Bis auf Probe HP9 weisen alle anderen Bodenproben mehr oder weniger gleich hohe Werte auf. Kobalt, Chrom und Nickel sind typische Schwermetalle in Serpentin.

Der allgemeine Trend, dass die Elemente gegen die Tiefe hin zunehmen, kann einer geologischen Quelle zugeschrieben werden.

Ein deutlicher Trend der Zunahme des  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Gehaltes gegen die Tiefe ist zu beobachten (Abbildung 42). Einzige Ausnahme bildet die Marmorprobe HP12. Auffallend ist die Probe HP10. Der 15% ige Eisenanteil ist möglicherweise auf den früheren Abbau, der sich rund um den Plankogel befunden haben soll, zurückzuführen. Ein so hoher Eisenanteil kann nur auf ein sich darunter befindendes Erz hinweisen. Außerdem zeigt die Probe HP10 auch einen außergewöhnlich hohen  $\text{TiO}_2$  Anteil an (Abbildung 43). Auch Probe HP4 weist einen hohen Titangehalt auf, außerdem ist in dieser Probe auch ein Trend in Richtung erhöhter Kobaltgehalte zu erkennen.

Die Mangangehalte sind in Abbildung 44 dargestellt. Hier weisen die Proben HP1, HP5, HP6, HP11 sowie HP17 relativ hohe Werte auf. Relativ hohe Mangangehalte sind typisch für die Siderite der Hüttenberger Erzprovinz (Prohaska, 2003). Möglicherweise sind einige dieser Anomalien auf dieses Erz zurückzuführen. Da Probe HP5 im Oberboden eine starke Anreicherung an Mangan aufweist, kann vermutet werden, dass es hier zur Ausbildung einer Mangankruste an der Oberfläche gekommen ist.

Erhöhte Suszeptibilitätswerte weisen die Proben HP4, HP9, HP10 und HP11 auf. HP10 und HP11 dürften auf die Plankogelvererzung hinweisen (Abbildung 45).



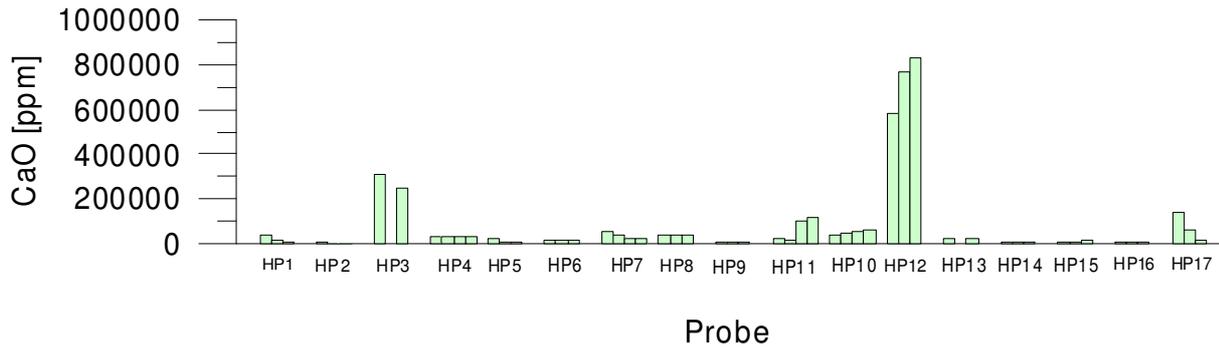


Abbildung 35: Darstellung der CaO-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

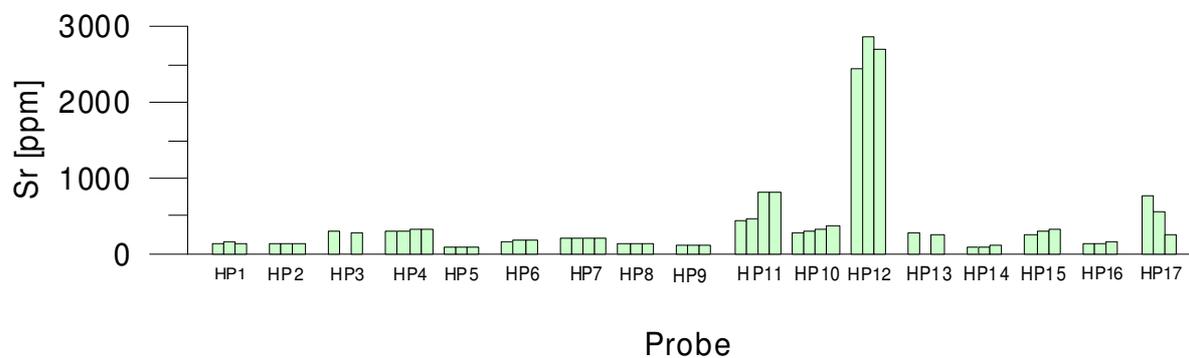


Abbildung 36: Darstellung der Strontium-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

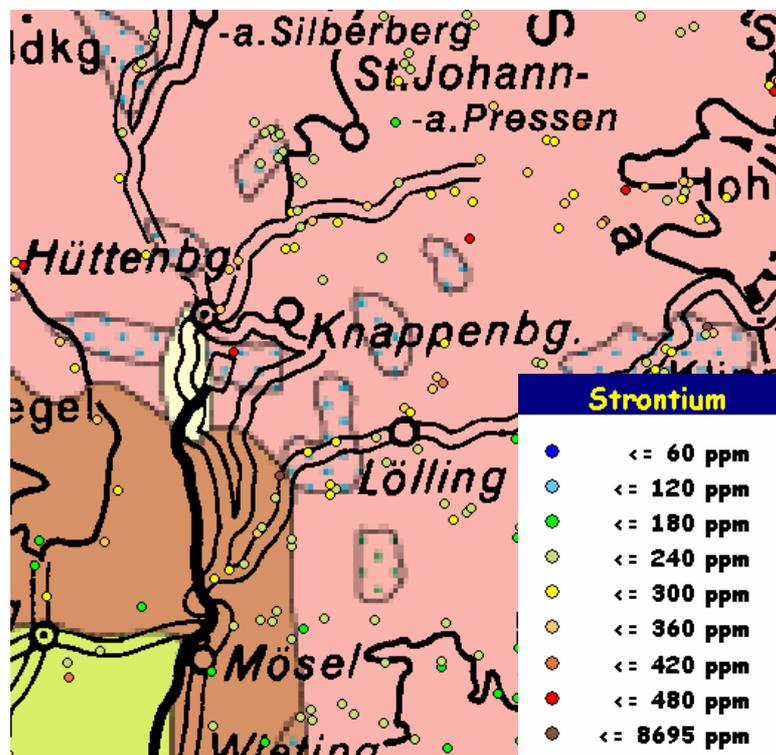


Abbildung 37: Darstellung der Strontiumwerte in den Bachsedimenten aus der Metallogenetischen Karte Österreich (Weber, 1999).

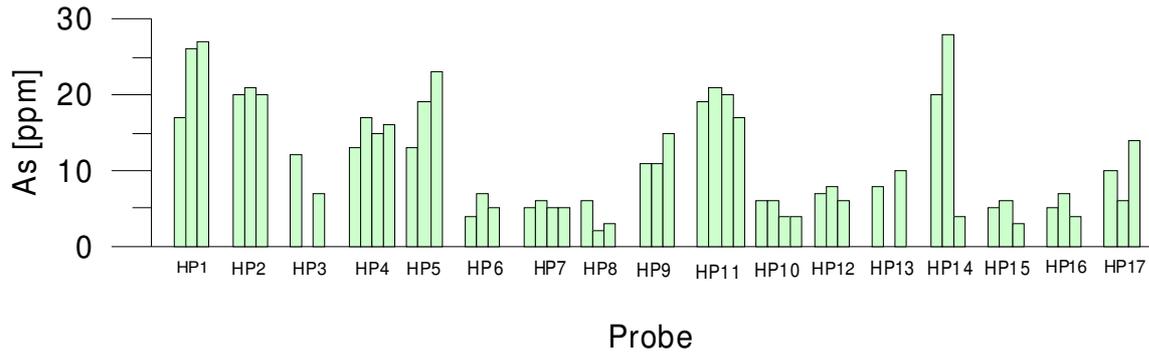


Abbildung 38: Darstellung der As-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

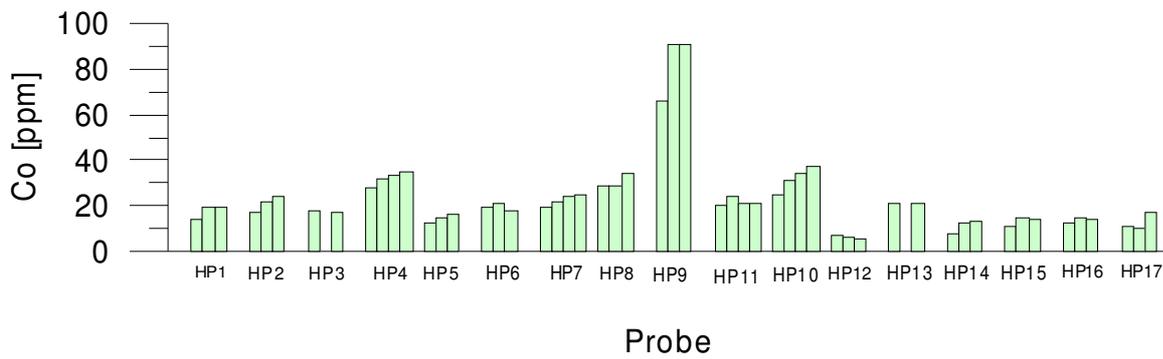


Abbildung 39: Darstellung der Co-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

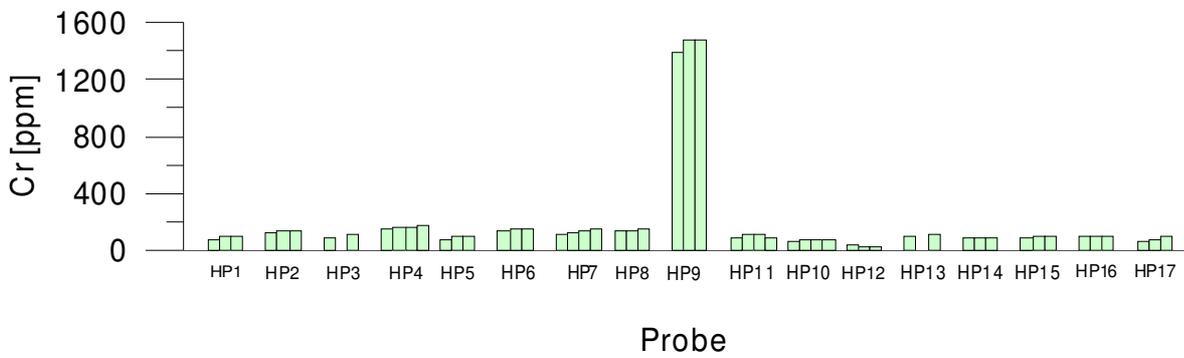


Abbildung 40: Darstellung der Cr-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

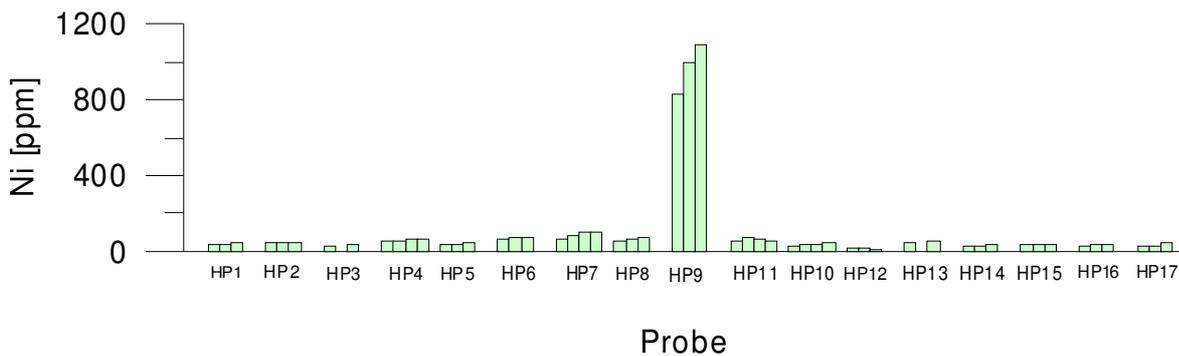


Abbildung 41: Darstellung der Ni-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

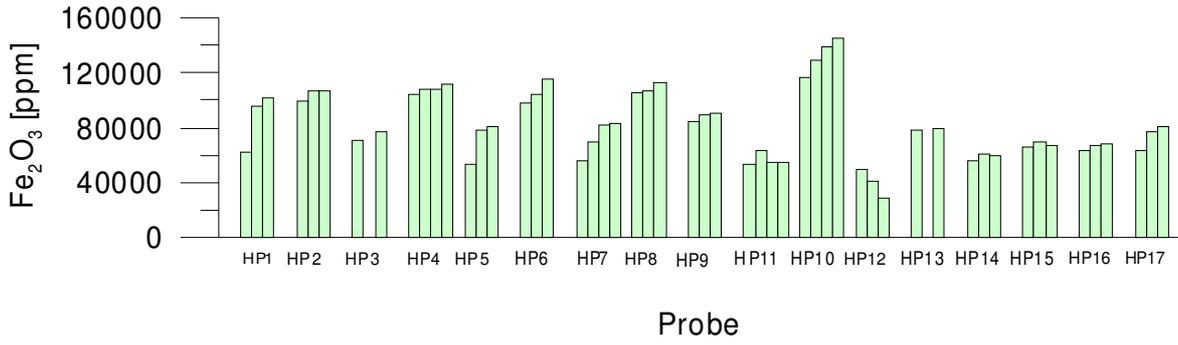


Abbildung 42: Darstellung der Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

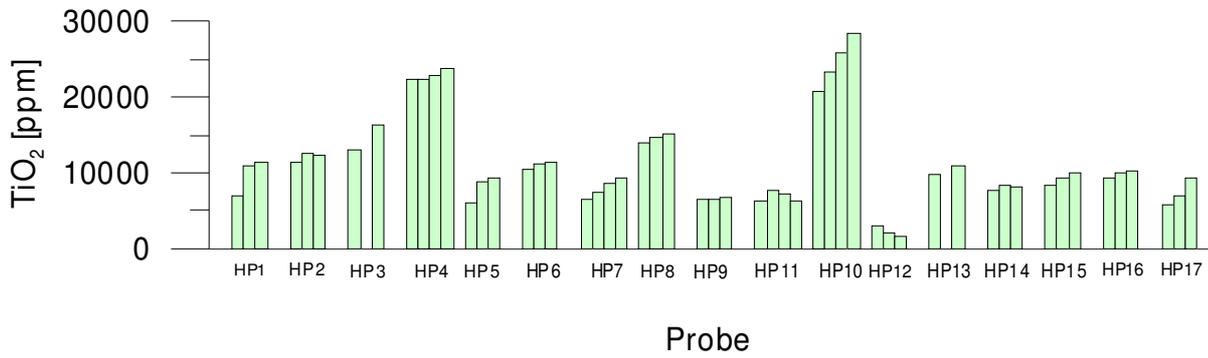


Abbildung 43: Darstellung der TiO<sub>2</sub>-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

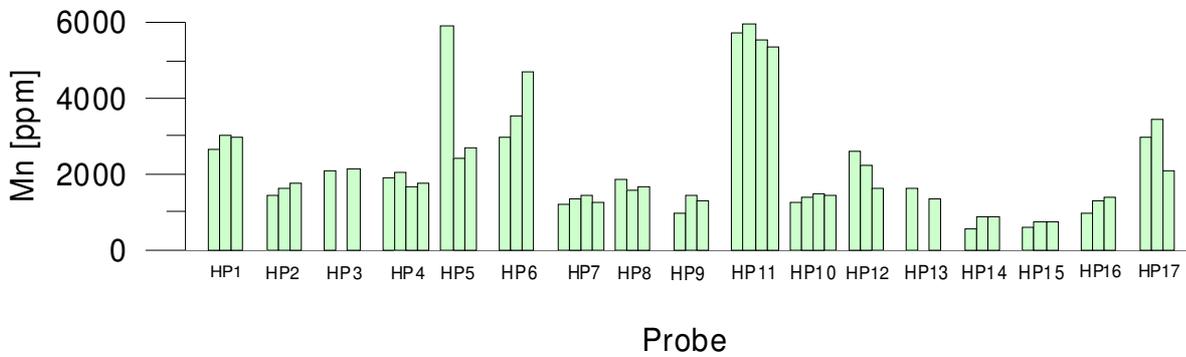


Abbildung 44: Darstellung der Mn-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

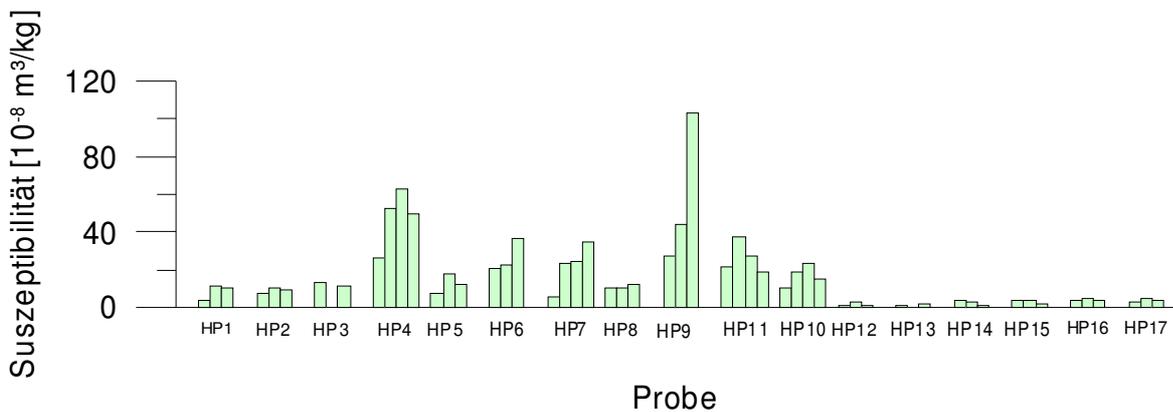


Abbildung 45: Darstellung der Suszeptibilitätsverteilung in den Proben HP1 bis HP17.

#### 4.4.3 Röntgendiffraktometrie

Die Röntgendiffraktometrie wurde an fünf ausgewählten Profilabschnitten der Bodenproben durchgeführt. Hierbei wurde das Hauptaugenmerk auf Proben mit relativ hohen Suszeptibilitäten gelegt, da diese durch eisenhaltige Minerale verursacht werden. Es wurden texturfreie Präparate angefertigt. Um mehr über den Gehalt an eisenhaltigen Mineralen in den Bodenproben zu erfahren, wurden die Proben teilweise einer zusätzlichen Analyse unterzogen. Dabei wurden Texturpräparate angefertigt, an denen Temperaturbehandlungen und/oder Ethylenglykolbehandlungen durchgeführt wurden. In Abbildung 46 wird die Probe HP6\_2 dargestellt. Die türkise Linie zeigt das Diffraktogramm des texturfreien Präparates. Weitere Diffraktogramme wurden mittels Texturpräparat erstellt (blau: Texturpräparat, grün: Ethylenglykolbehandlung, rot: thermische Behandlung). Um die Identifizierung der eisenhaltigen Mineralphasen zu erleichtern, wurden zusätzlich drei Erzproben analysiert. Abbildung 47 zeigt das Röntgendiffraktogramm von Probe KE5. Diese Probe wurde an einem nicht öffentlich zugänglichen Teil des Schautollens in Knappenberg entnommen. Der Großteil des Bodens wird von Tonmineralen und Quarz gebildet. Weitere Minerale sind Amphibole und Plagioklase. In einigen Bodenproben konnten außerdem Spuren von Goethit (bzw. Limonit), Magnetit, Hämatit und Siderit nachgewiesen werden. In Tabelle 7 sind die Abkürzungen der Minerale aus den Röntgendiffraktogrammen dargestellt. Die restlichen Diffraktogramme befinden sich im Anhang.

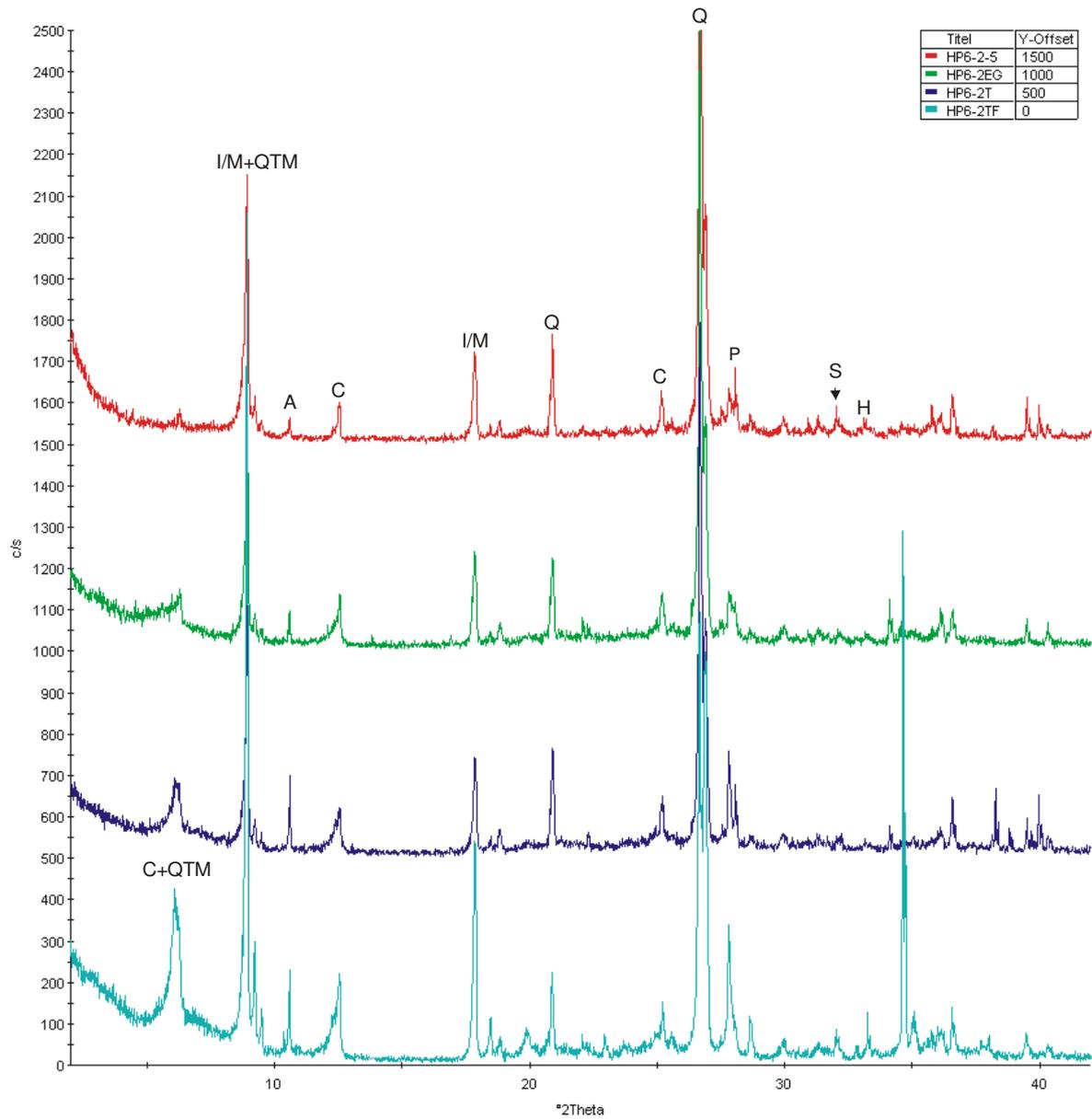
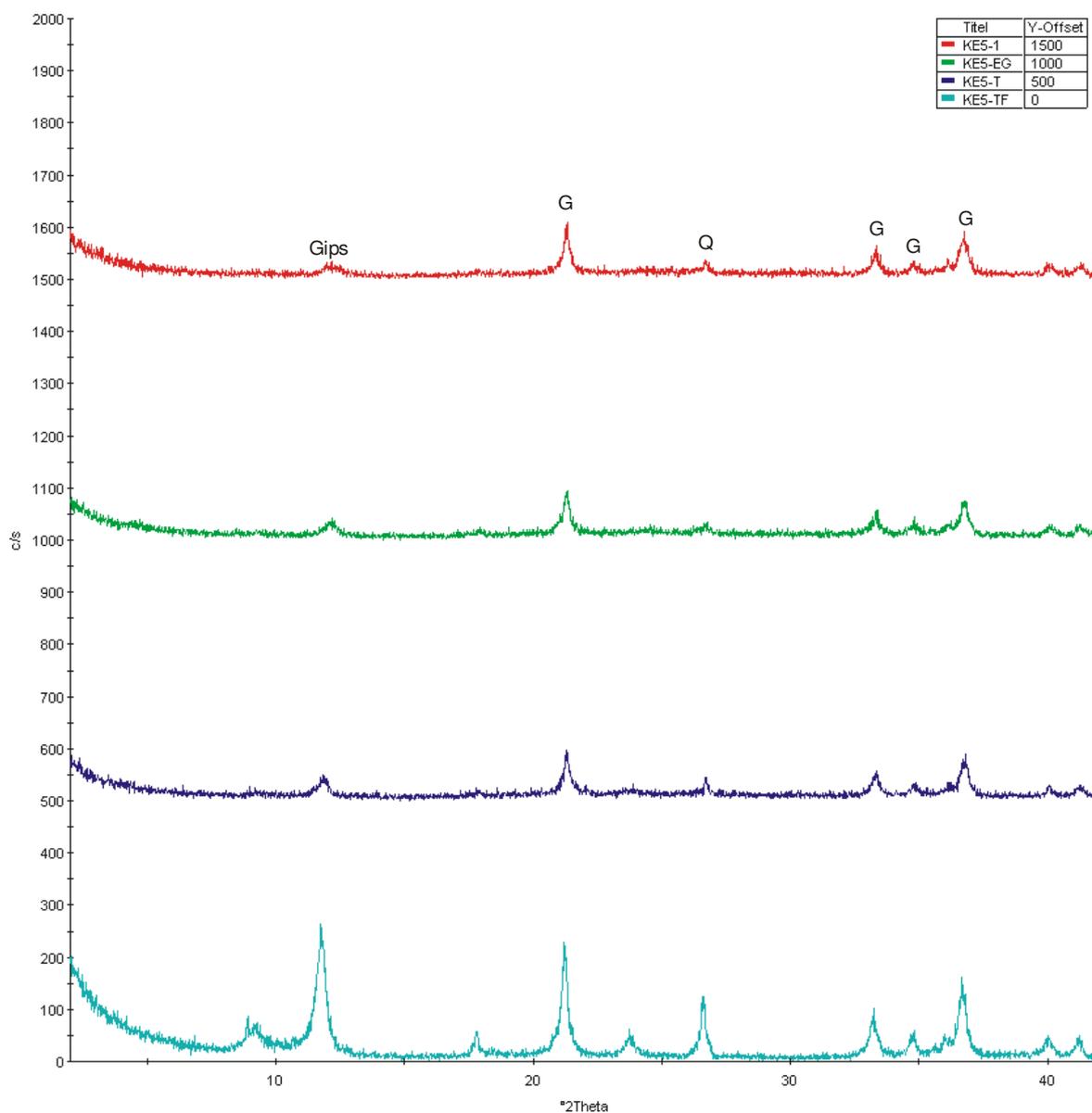


Abbildung 46: Röntgendiffraktogramme der Probe HP6\_2.



**Abbildung 47:** Röntgendiffraktogramme der Probe KE5.

Abkürzung	Mineral
QTM	quellfähige Tonminerale
I	Ilmenit
M	Magnetit
A	Amphibolit
K	Kaolinit
C	Chlorit
Q	Quarz
P	Plagioklas
S	Siderit
G	Goethit
H	Hämatit

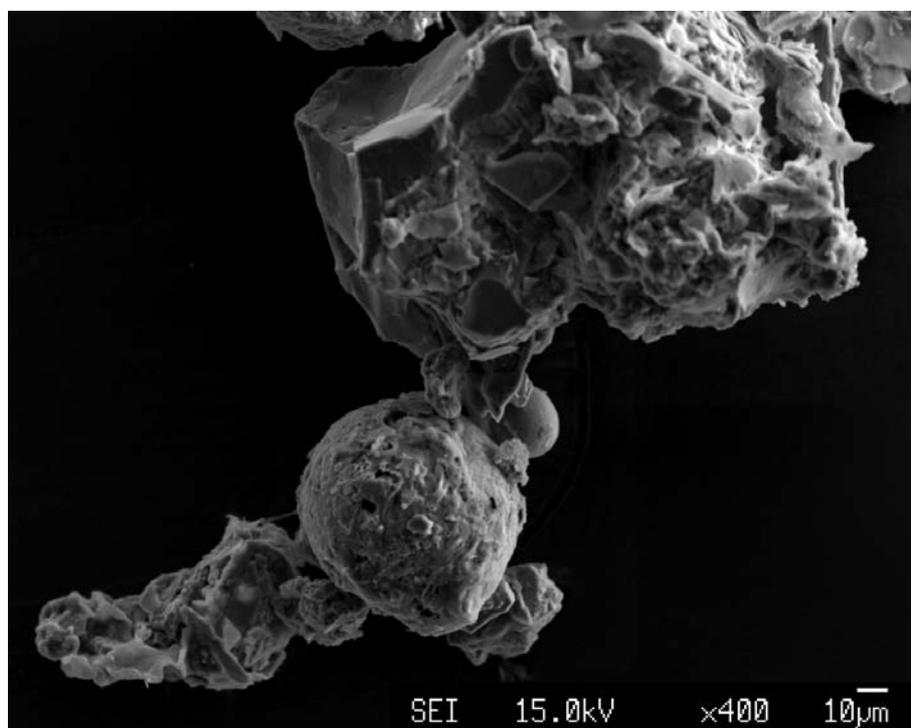
**Tabelle 7:** Abkürzungen der Minerale in den Röntgendiffraktogrammen.

#### 4.4.4 Mikrosonde

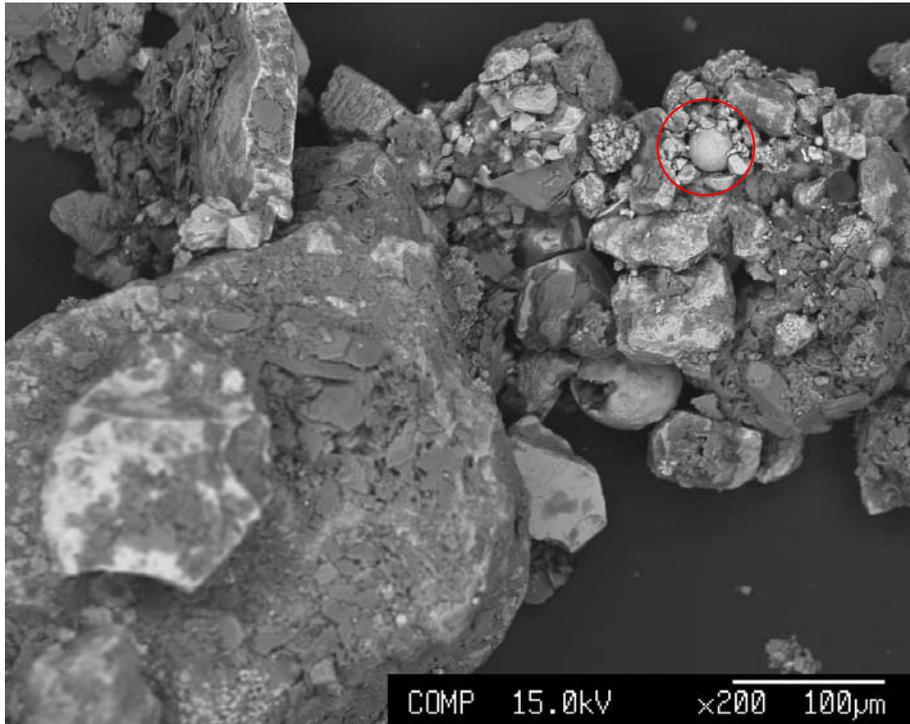
Die Mikrosondenanalyse ermöglicht nicht nur eine visuelle und quantifizierte Analyse der magnetischen Komponenten in den Proben, sondern zum Teil auch eine qualitative Analyse. Es konnte ein zementierter Hauptbestand und teilweise einzelne Komponenten geogener und anthropogener Natur beobachtet werden. Der anthropogene Anteil der Proben wird durch die sphärischen Komponenten charakterisiert. Die kugelige Form deutet meist auf Verbrennungsprozesse als ursprüngliche Quelle hin (Matzka u. Maher, 1999). Mit Hilfe der Mikrosonde war es möglich zu klären, aus welchen Elementen diese kugeligen Komponenten bestehen. Ihr Hauptbestandteil ist Eisen (Abbildung 48). Manchmal wurde ein geringer Anteil Mangan ermittelt (Abbildung 49). An manchen Kugeln wurden Spuren von Aluminium und Silizium nachgewiesen, welche aber mit großer Wahrscheinlichkeit den Silikaten, die sich an der Oberfläche der Kugeln angeheftet haben, zuzuschreiben sind.

Die zementierten Hauptbestandteile der magnetischen Fraktion bestehen aus Na-, K- und Mg-Silikaten sowie Quarz und Glimmer (Abbildung 50). Außerdem konnten Chlorit sowie Apatit und Titanit nachgewiesen werden. In den Proben HP1 und HP4 wurden Magnetitkristalle geogenen Ursprungs gefunden (Abbildung 51, 52, 53). Sie konnten aufgrund ihrer Oktaederstruktur und der Mikrosondenanalyse als Magnetit identifiziert werden. In den anderen Proben wurden keine solche Kristalle gefunden. Die kugeligen Komponenten in den Bodenproben HP7, HP8 und HP10 haben eine Größe zwischen 10 und 50  $\mu\text{m}$  und besitzen die unterschiedlichsten Oberflächenstrukturen (Abbildung 54, 55, 56, 57). Metallisches Silizium, welches Eisen und Mangan eingeschlossen hat, wurde in HP7 beobachtet (Abbildung 58). Diese Strukturen entstehen bei der Verhüttung von Eisen, weil Silizium dort als Flussmittel zugegeben wird ([http://de.encarta.msn.com/encyclopedia\\_761559225/Stahl.html](http://de.encarta.msn.com/encyclopedia_761559225/Stahl.html)). Bodenprobe HP 7 (Abbildung 59) zeigt einen Anwachssaum aus lauter kleinen Fe- Kugeln. Möglicherweise besteht das Gemenge aus diesen Kugeln und wurde erst später von Silikaten überwachsen. Der helle Teil im oberen Bereich des Gemenges weist einen erhöhten Fe- Gehalt auf, dieser könnte sich erst später als Belag abgeschieden haben. Die Mikrosondenanalyse der Probe HP9 ergab ein Gemenge aus Ilmenit, Zirkon, Serpentin, Magnetit, Chlorit, Chromit und Titanit. Den Hauptbestandteil bildet Serpentin. Abbildung 60 zeigt die Anzahl der kugeligen Komponenten in den einzelnen Bodenhorizonten. Auffallend dabei sind Probe HP4, die überhaupt keine kugeligen Komponenten aufweist und die Proben HP8, HP10

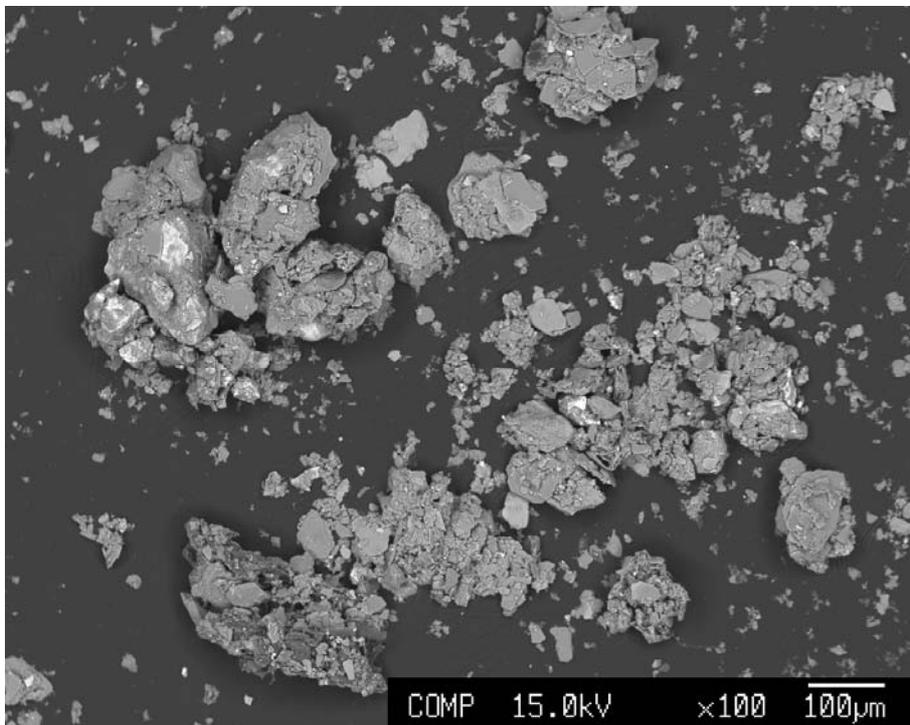
und HP15, die einen Rückgang an kugeligen Komponenten in Richtung tiefere Bodenschichten anzeigen. Dieser Rückgang an kugeligen Komponenten gegen die Tiefe deutet auf anthropogen beeinflusste Proben hin.



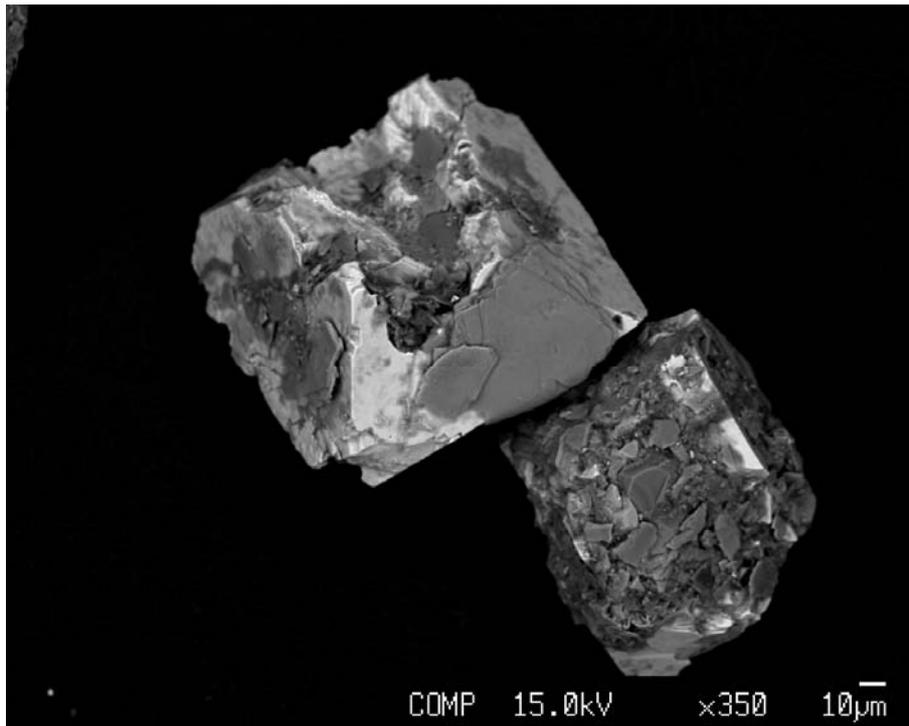
**Abbildung 48:** Mikrosondenaufnahme einer großen Kugel aus Probe HP1 bestehend aus Eisen.



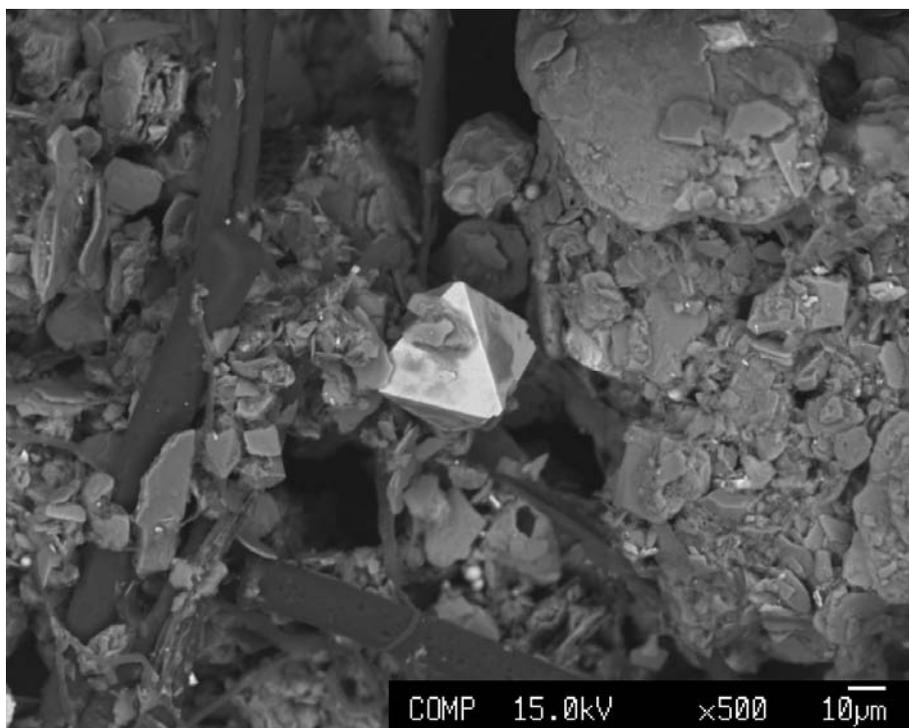
**Abbildung 49:** Mikrosondenaufnahme der Probe HP1. Kugelige Komponente bestehend aus Eisen und Spuren von Mangan.



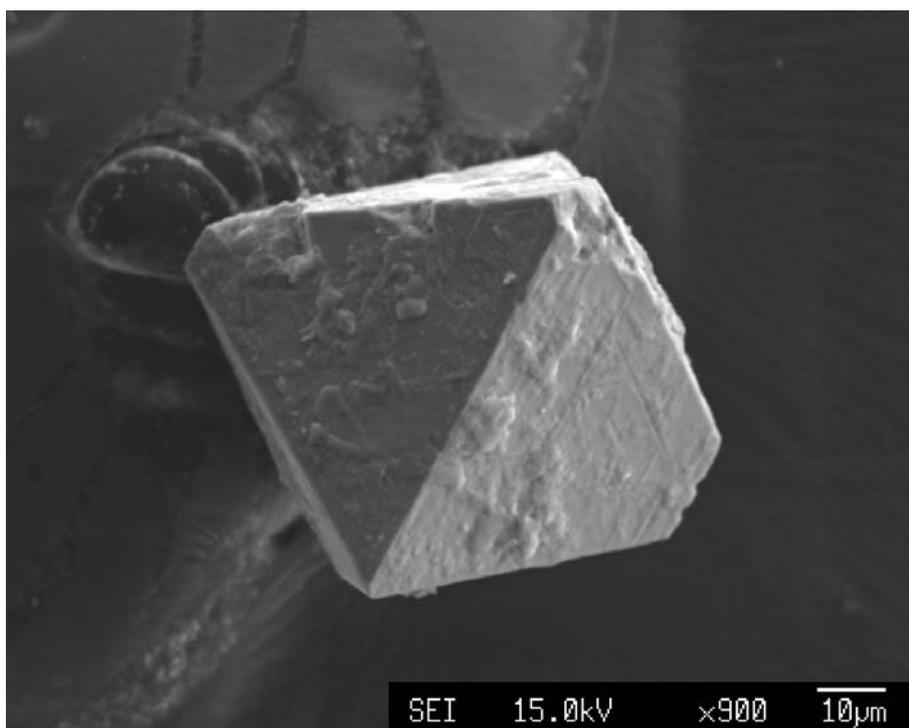
**Abbildung 50:** Mikrosondenaufnahme der zementierten Hauptbestandteile.



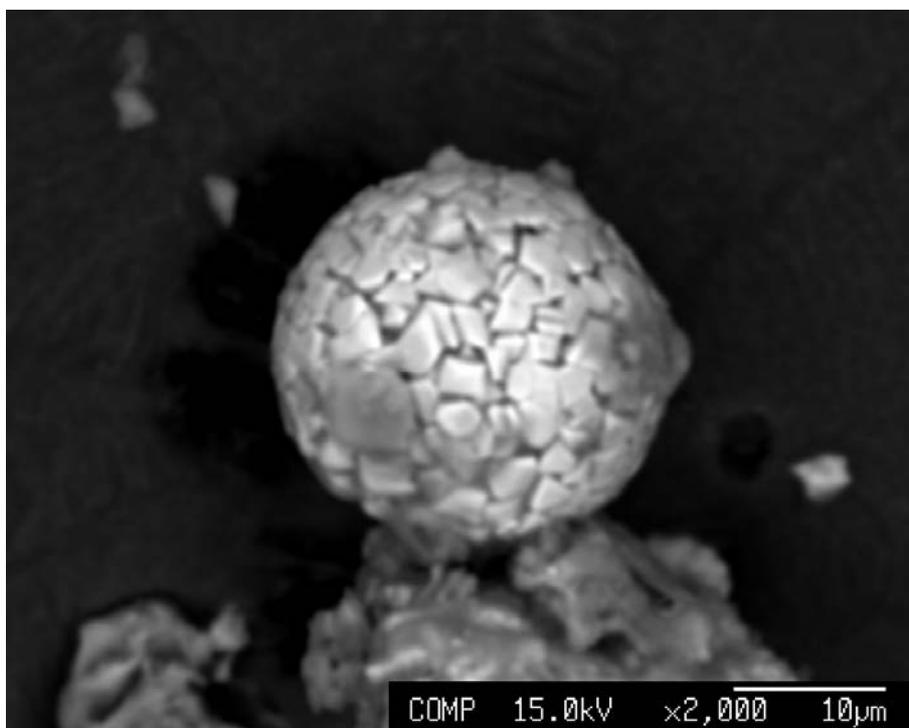
**Abbildung 51:** Magnetitkristall aus Probe HP1, ca. 100 µm groß.



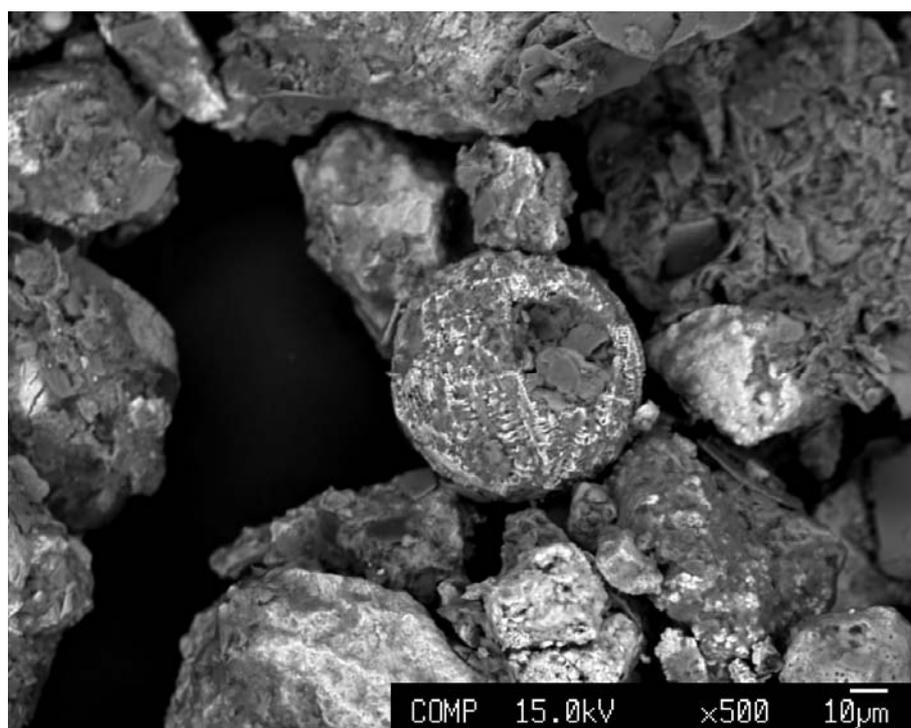
**Abbildung 52:** Magnetitkristall aus Probe HP4, ca. 40 µm groß.



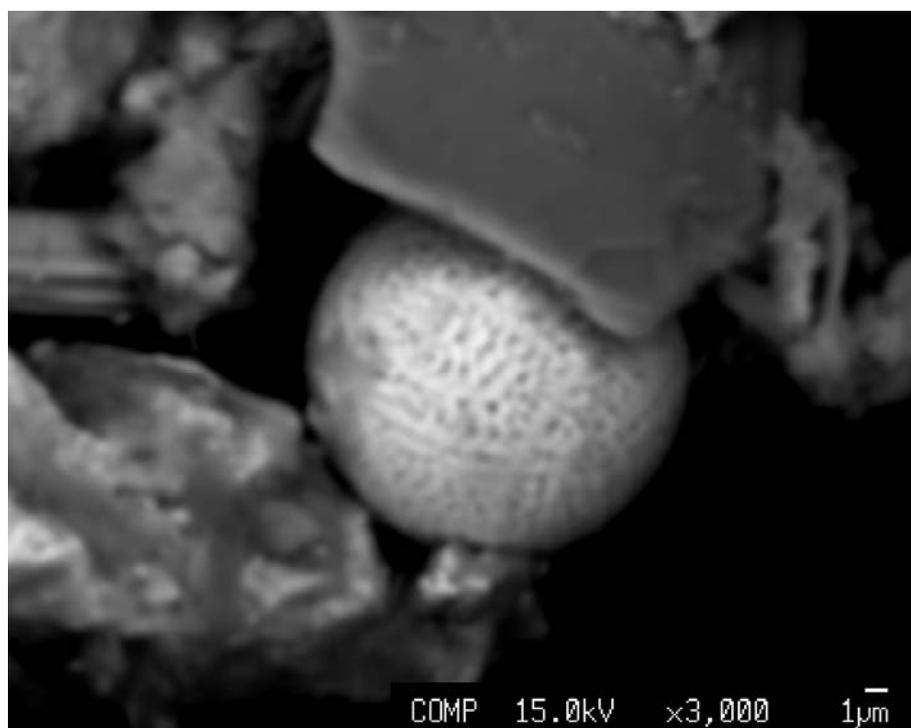
**Abbildung 53:** Magnetitkristall aus Probe HP4, ca. 100 µm groß.



**Abbildung 54:** Kugelige Komponente aus Probe HP7, ca. 20 µm groß.



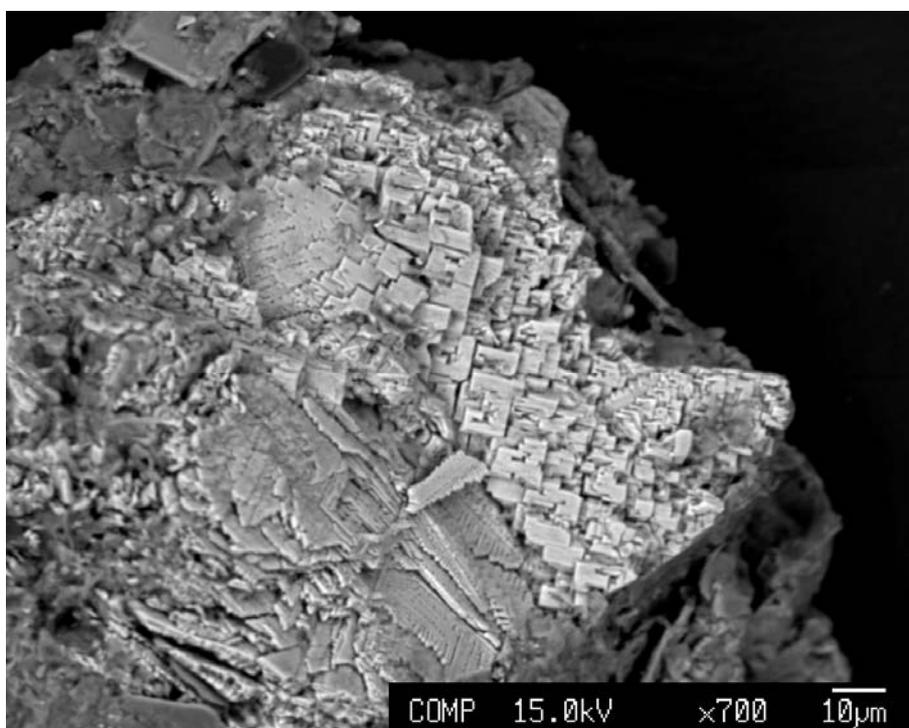
**Abbildung 55:** Kugelige Komponente aus Probe HP7, ca. 40 µm groß.



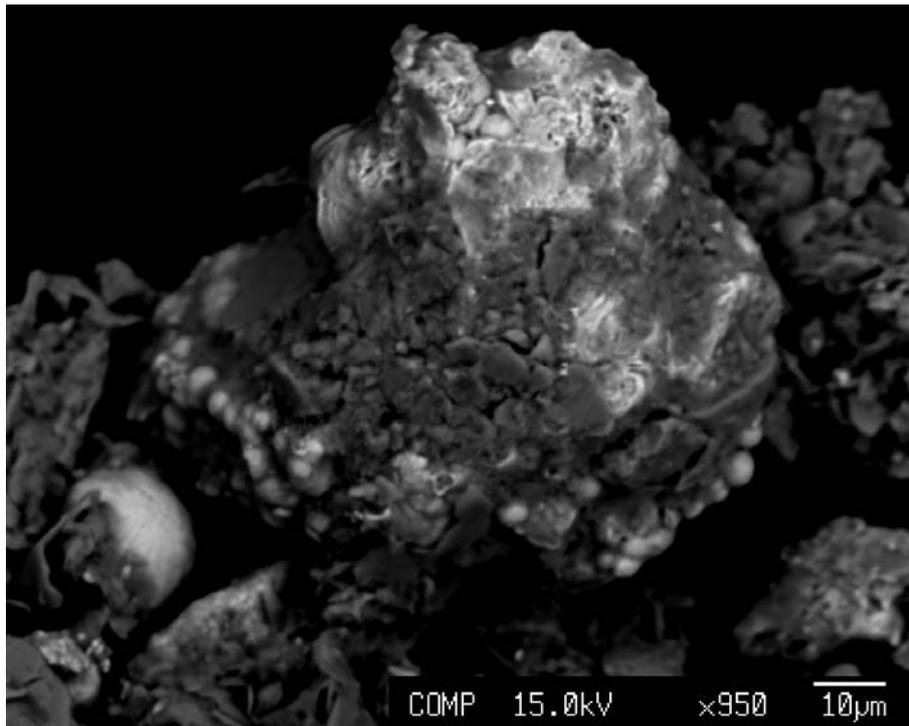
**Abbildung 56:** Kugelige Komponente aus Probe HP8, ca. 10 µm groß.



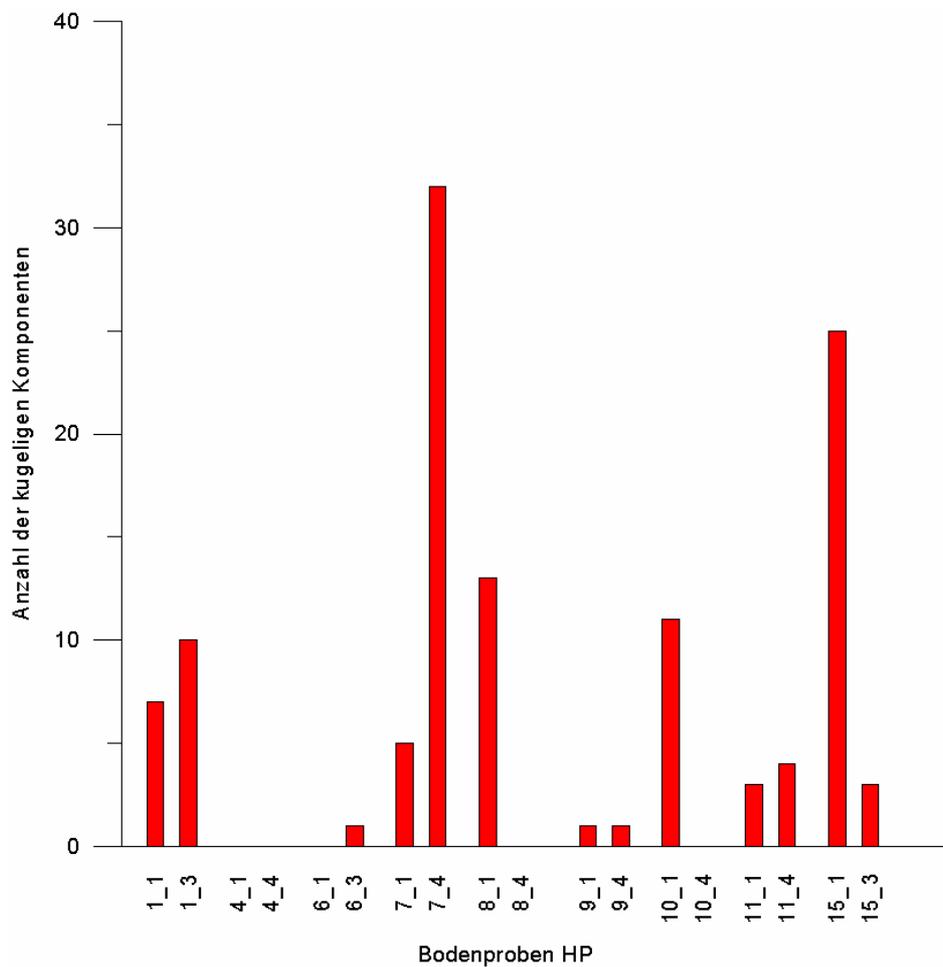
**Abbildung 57:** Kugelige Komponente aus HP10, ca. 40 µm groß.



**Abbildung 58:** Metallisches Silizium aus Probe HP7.



**Abbildung 59:** Anwachssaum von kleinen Fe- Kugeln.

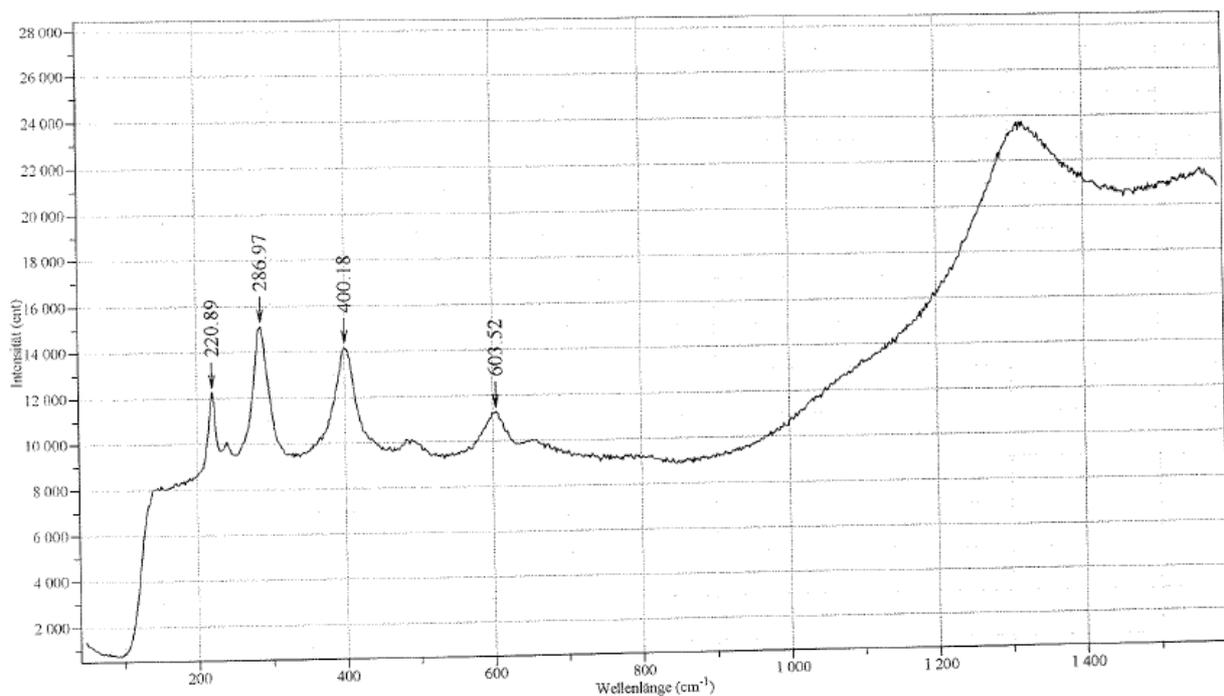


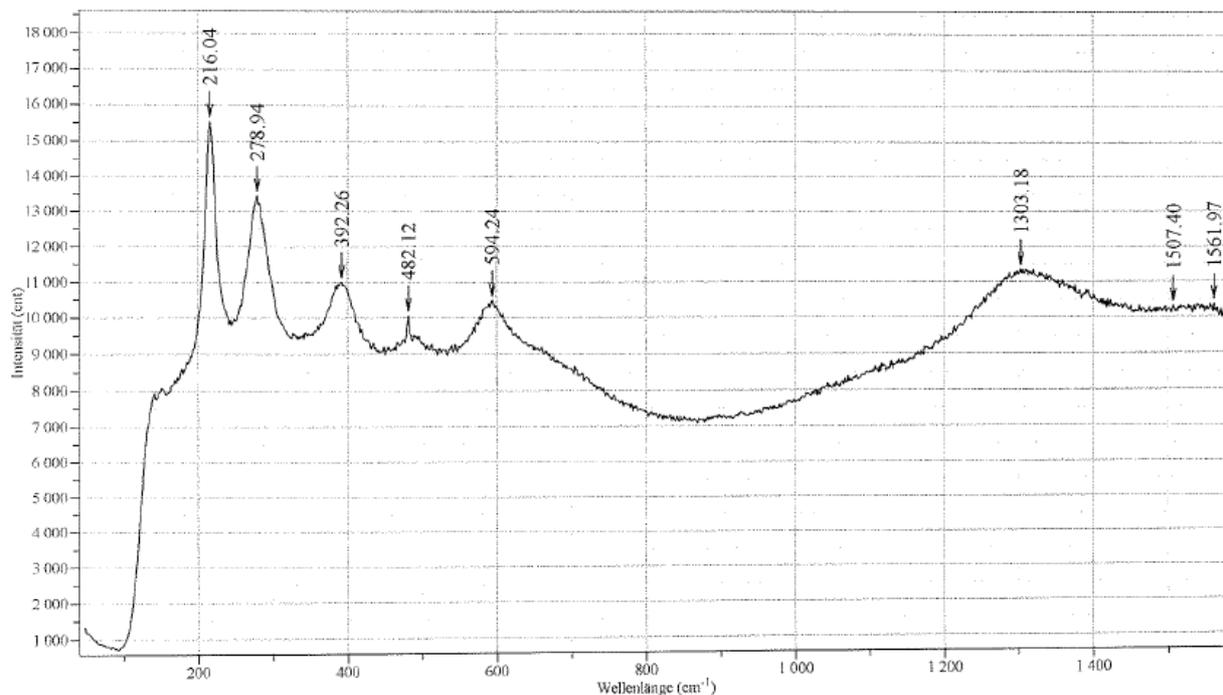
**Abbildung 60:** Ergebnis der quantitativen Abschätzung von kugeligen Komponenten.

#### 4.4.5 Ramananalyse

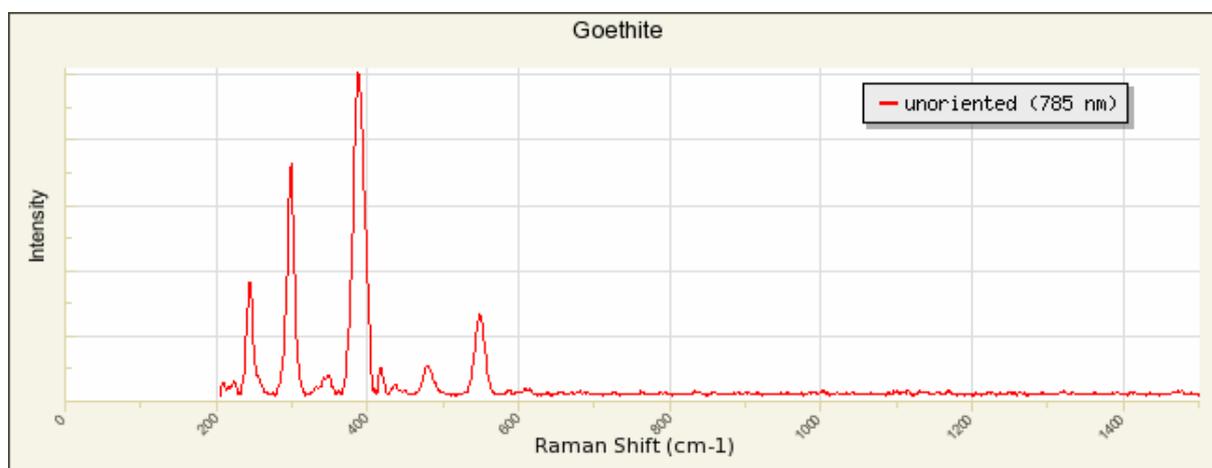
Um zu klären, ob die kugeligen Komponenten aus einem Mineral bestehen, wurde zusätzlich eine Ramananalyse an Probe HP1 durchgeführt (Abbildung 61). Die Analyse konnte nur an Kugeln, wie in Abbildung 48 dargestellt, stattfinden, weil man unter dem Mikroskop nur Kugeln, die sich am Rand eines Gemenges befinden, identifizieren kann.

Die Spektren der gemessenen Kugeln stimmen annähernd mit dem des Goethits (Abbildung 62) überein. Die Peaks bei  $1300\text{ cm}^{-1}$  Wellenlänge sind dem Graphit zuzuordnen. Ob alle kugeligen Komponenten diese Zusammensetzung aufweisen, konnte nicht geklärt werden.





**Abbildung 61:** Ramanspektren von 2 der kugeligen Komponenten. Ihr Spektrum ist dem des Goethits sehr ähnlich.

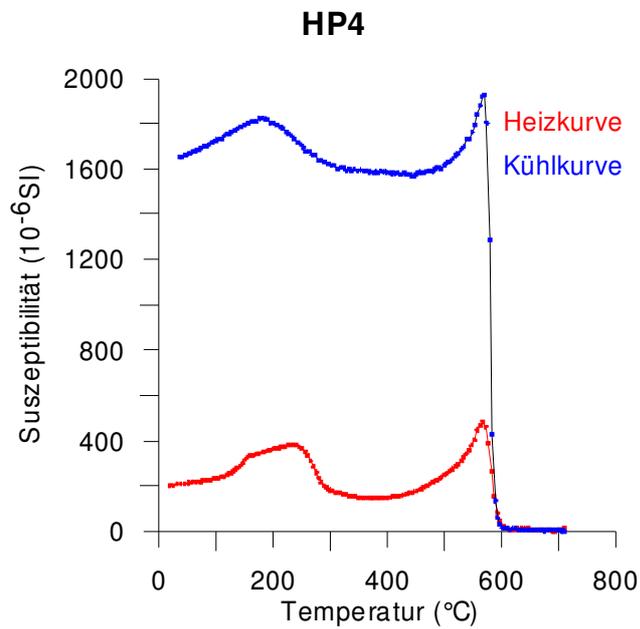


**Abbildung 62:** Ramanspektrum eines Goethit aus <http://ruff.info/goethite/names/asc/X050093>.

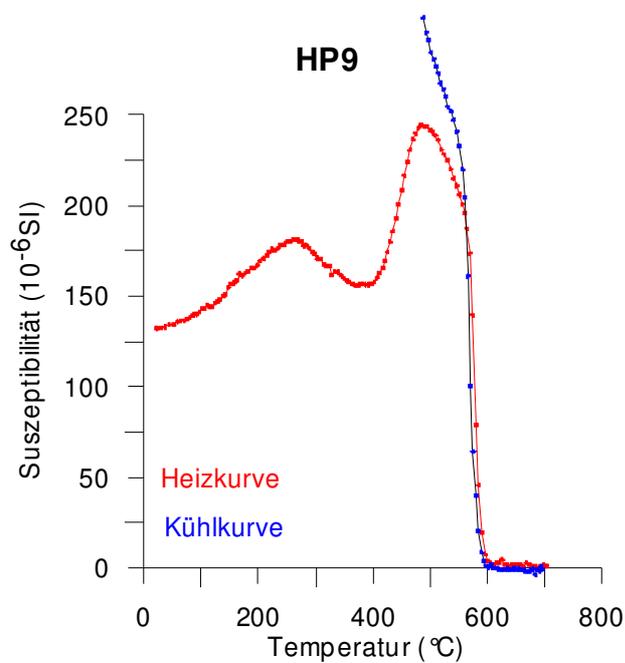
#### 4.4.6 Curietemperaturbestimmung

Die Bestimmung der Curiepunkte erfolgte nach der graphischen Bestimmungsmethode. Die Curiepunkte liegen bei rund 580°C, was für Magnetit spricht (Soffel, 1999) (Abbildungen 63, 64, 65). Die Tatsache, dass die Proben fast alle einen steilen Abfall aufweisen, bedeutet, dass es sich um homogene Proben

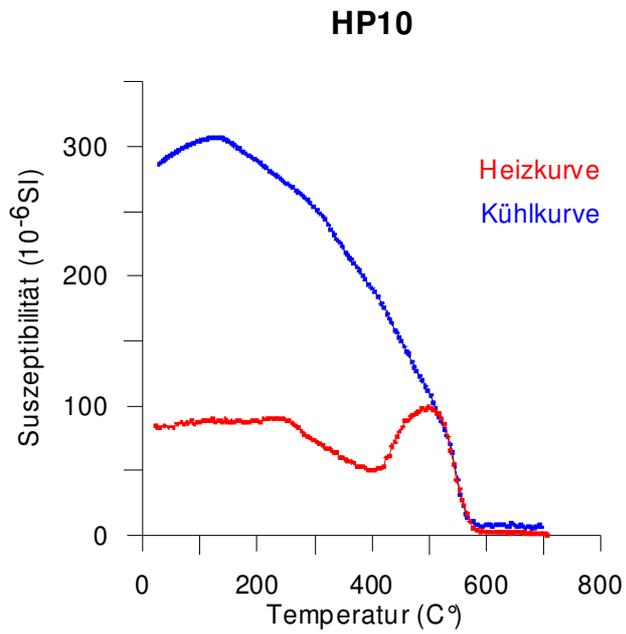
handelt. Der Peak bei ca. 300°C weist auf Phyrrothit (Abbildungen 63, 64, 65) als zweite wichtige Mineralphase hin (Soffel, 1999).



**Abbildung 63:** Curiepunkt-Bestimmung an Bodenprobe HP4. Gesamtdarstellung der Thermomagnetischen Kurve.



**Abbildung 64:** Curiepunkt-Bestimmung an Bodenprobe HP9. Gesamtdarstellung der Thermomagnetischen Kurve.



**Abbildung 65:** Curiepunkt-Bestimmung an Bodenprobe HP10. Gesamtdarstellung der Thermomagnetischen Kurve.

# 5 Interpretation

Die Verteilung der magnetischen Suszeptibilität ergibt drei Anomaliezentren entlang der Verbindungsstrasse zwischen Heft und Mosinz, südlich des Hüttenberger Zentrums und am südlichen Rand des Arbeitsgebietes. Zusätzlich gibt es noch vier weitere punktuelle Anomalien im Bereich von Obersemlach, Knappenberg, Großkoll und in Lölling.

Aufgrund der in situ gemessenen Werte der Volumensuszeptibilität sowie der an Laborproben gemessenen Massensuszeptibilität und Frequenzabhängigkeit wurde ein Profil ausgewählt, entlang dessen Bodenstechkerne entnommen wurden. Mit Hilfe der vertikalen Suszeptibilitätsverteilung entlang dieser Profile konnte eine erste Unterscheidung anthropogen bzw. geogen beeinflusster Böden vorgenommen werden. Zur Bestimmung der magnetischen Trägerminerale dienten SIRM-Analyse sowie Curietemperaturbestimmung. Als zusätzliche Verfahren wurden Röntgendiffraktometrie, Mikrosondenanalyse, Ramanspektrometrie und eine Röntgenfluoreszenzanalyse durchgeführt.

Die Anomalie zwischen Heft und Mosinz ist fast ausschließlich auf den Nahbereich der Straße beschränkt. Ihre Ausbreitung zeigt eine generelle Übereinstimmung mit der Orientierung des Tales. Da sich entlang dieser Straße Relikte der früheren Eisenindustrie befinden ist eine technogene Herkunft der Anomalie sehr wahrscheinlich. In diesem Bereich ist eine Häufung von Proben mit erhöhten Magnetitkonzentrationen zu beobachten. Die hohe Magnetitkonzentration wird durch natürlich gebildete Magnetite oder durch die kugeligen Komponenten, welche teilweise in den Magnetseperaten gefunden wurden, hervorgerufen. Die globularen Körper aus Magnetit mit Eisenkern, Magnetitkügelchen oder auch Hohlkörper entstehen als Verbrennungsfunken, wobei Temperaturen erzeugt werden müssen, die die Schmelzpunkte von  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  und  $\text{Fe}$  also  $1440^\circ\text{C}$  für Wüstit und  $1500^\circ\text{C}$  für Eisen mindestens erreichen. Die glühend, geschmolzen oder verdampfend in die Atmosphäre geschleuderten Schmelztröpfchen verfestigen sich während der Beschleunigung im freien Fall sowie im gelegentlichen Auftreten von Drehimpulsen (Seeliger & Mücke, 1974). Hingegen hat die vertikale Suszeptibilitätsverteilung der Bodenproben HP16 und HP17, welche sich in unmittelbarer Nähe dieser Anomalie befinden, allerdings in größerer Seehöhe liegen, kein Ergebnis erbracht, welches auf technogen beeinflusste Böden zurückschließen lässt. Die chemische Analyse ergab für die Bodenprobe HP17 erhöhte Kalzium-, Strontium- und Manganwerte. Die

erhöhten Strontiumwerte stehen in direktem Zusammenhang mit dem Kalziumgehalt (Gao et al., 1998). Die Manganwerte bilden wiederum einen Hinweis auf technogenen Eintrag, da Mangan als Zuschlagstoff für die Eisenherstellung verwendet wurde.

Die Anomalie südlich des Hüttenberger Zentrums weist einen Zusammenhang mit dem stillgelegten Bahnhof auf, da sich die Anomalie entlang der Bahntrasse Richtung Süden zieht. Den Höhepunkt findet diese Anomalie am Stolleneingang, der sich direkt über dem Bahnhof befindet. Diese Tatsache könnte auf einen früheren Haldenplatz zurückzuführen sein. Außerdem konnte ein technogener Einfluss nachgewiesen werden, dieser kann mit der Verhüttung in der Umgebung von Hüttenberg in Zusammenhang gebracht werden.

Der südliche Teil des Arbeitsgebietes liegt in der Gurktaler-Decke, welche aus verschiedensten Phylliten und Chlorit-Albitschiefern aufgebaut ist. In Abbildung 4 lässt sich ein Zusammenhang mit dieser Lithologie erkennen. Die Messpunkte mit den erhöhten Werten ziehen sich entlang der Verbindungsstraße nach Knappenberg. Auffallend ist, dass die erhöhten Suszeptibilitätswerten bis in höhere Lagen zu verfolgen sind. Mit Hilfe der Mikrosonde konnten Magnetitkristalle mit einer Größe zwischen  $40\mu$  und  $100\mu$  nachgewiesen werden. Der Anteil an kugeligen Komponenten ist, bis auf Probe HP1, welche unmittelbar an der Kreuzung Hüttenberg-Lölling liegt, eher gering. Die Tiefenverteilungen der Suszeptibilitäten der Proben HP1 bis HP6 weisen auf geogen beeinflusste Böden hin. Aus der chemischen Analyse geht hervor, dass die Proben HP1 bis HP5 erhöhte Arsenwerte besitzen. Die Probe HP4 weist einen hohen Titangehalt auf und zeigt außerdem einen Trend in Richtung erhöhtem Kobaltgehalt.

HP5 und HP6 besitzen erhöhte Mn Gehalte, welche auf das manganreiche Erz zurückzuführen sind (Prohaska, 2003). Aus den Röntgendiffraktogrammen geht hervor, dass in den Bodenproben HP4 und HP6 geringe Mengen an Siderit vorkommen. Die in Lölling punktuell auftretende Anomalie lässt auf einen Zusammenhang mit der früheren Eisenindustrie schließen. Somit lässt sich hier auf anthropogen dominierte Böden schließen.

Die Anomalie in Knappenberg befindet sich direkt unterhalb des früheren „Fuchs“-Tagebaus und ist über einer ehemaligen Halde gelegen.

Im Gelände wurden in Obersemlach Erzausbisse beobachtet, die für die dortige Anomalie verantwortlich sein können. Die Bodenproben HP7, HP8 und HP9 weisen eine vertikale Suszeptibilitätsverteilung auf, welche auf geogen beeinflusste Böden hinweisen. Die Bodenprobe HP9 wurde an einem Punkt entnommen, der sich laut geologischer Karte über einem Serpentinitt befindet. Mit Hilfe der Mikrosonde konnte ein entsprechender Mineralogiebestand nachgewiesen werden. Kobalt, Chrom und Nickel welche typische Schwermetalle in Serpentinitten sind, zeigen einen Trend der Zunahme gegen die Tiefe. Außerdem lässt sich eine Zunahme des Eisengehaltes gegen die Tiefe hin erkennen.

Die Mikrosondenanalyse ergab für die Probe HP7 eine erhöhte Anzahl an kugeligen Komponenten im Bereich des Unterbodens. Möglicherweise kam es aufgrund von Verhüttungsprozessen im Bereich von Semlach zu einer Anreicherung dieser anthropogen gebildeten Komponenten.

Die vierte punktuell auftretende Anomalie befindet sich am Großkoll. Im Gelände konnte ein Hügel beobachtet werden, der diese erhöhte Suszeptibilität verursacht hat. Da sich dieser Messpunkt in größerer Seehöhe befindet, ist ein atmosphärischer Eintrag anthropogen verursachter Partikel durch Wind auszuschließen. Die Bodenproben HP14 und HP15, welche sich in unmittelbarer Nähe des Messpunktes befinden, zeigen eine vertikale Suszeptibilitätsverteilung, die auf anthropogen beeinflusste Böden rückschließen lässt. Auffallend ist das Ergebnis der Mikrosondenanalyse, welche einen starken Rückgang an kugeligen Komponenten von höheren Bodenschichten in tiefere aufzeigte. Aufgrund der Suszeptibilitätsverteilung sowie der Mikrosondenanalyse lässt sich hier auf einen früheren Verhüttungsplatz schließen.

Am Plankogel zeigen die Bodenproben HP10 und HP11 in der vertikalen Suszeptibilitätsverteilung eine Zunahme gegen die Tiefe. Die chemische Analyse ergab eine erhöhte Arsenkonzentration bei HP11. Der Grund dafür dürfte die Nähe zum Serpentinitt sein. Außerdem weist diese Bodenprobe erhöhte Manganwerte auf. Der hohe  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Gehalt von HP10 weist auf ein sich darunter befindliches Erz hin. Der außergewöhnlich hohe Titangehalt lässt auf ein titanreiches Erz schließen. Das Röntgendiffraktogramm von HP11 zeigt einen geringen Anteil an Siderit und Hämatit.

Hinweise auf Goethit gibt es in dieser Probe keine. Die Mikrosondenanalyse ergab für HP10 einen relativ hohen Anteil an sphärischen Komponenten im Oberboden. HP11 hingegen zeigt für Ober- und Unterboden einen fast gleich großen Anteil dieser Komponenten. Der Eintrag dürfte im Zuge früherer Verhüttungsprozesse erfolgt sein, da die kugeligen Komponenten schon deutliche Spuren von Verwitterung aufweisen.

Die Suszeptibilitätsverteilung im Bereich von HP12 ist unauffällig, ebenso wie ihre vertikale Verteilung. Die chemische Zusammensetzung hingegen unterscheidet sich völlig von den anderen Bodenproben. Der Anteil an CaO beträgt 80%. Ebenso ist der Anteil an Strontium im Gegensatz zu den anderen bedeutend höher. Zuerst wurde vermutet, dass es sich bei dieser Probe um Straßenschotter handelt, weil sie sich nicht auf einem der kartierten Marmorzüge befindet. Um zu untermauern, dass es sich um Straßenschotter handelt, wurde ein Marmorstück aus einem der umliegenden Steinbrüche ebenfalls einer chemischen Analyse unterzogen und mit Probe HP12 verglichen. Es konnte keine Übereinstimmung nachgewiesen werden. Aufgrund der Messergebnisse lässt sich vermuten, dass die Bodenprobe über einem nicht kartierten Marmorzug entnommen wurde.

Die Röntgendiffraktometrie wurde durchgeführt, um alle möglicherweise vorhandenen Eisenminerale zu erfassen. Hierfür wurden die Proben ausgewählt, welche hohe Suszeptibilitäten aufweisen. Der Großteil des Bodens wird von Tonmineralen und Quarz gebildet. Goethit, Magnetit, Hämatit und Siderit konnten in Spuren nachgewiesen werden.

Um die Zusammensetzung der sphärischen Komponenten zu analysieren wurde an ausgewählten Kugeln eine Ramanspektroskopie durchgeführt. Mit dem Mikroskop konnten nur Kugeln erfasst werden, welche sich am Rande eines Mineralaggregats befanden. Die erhaltenen Spektren stimmen annähernd mit dem des Goethits überein. Wie schon Seeliger und Mücke (1974) beschreiben, handelt es sich bei den globularen Partikeln um Magnetit mit Eisenkern, Magnetitkügelchen oder auch um Hohlkörper. Dass die Oberfläche aus Goethit besteht, wäre so zu erklären, dass es zu einer Verwitterung gekommen ist, bei der sich der Magnetit in Goethit umgewandelt hat. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass es sich um natürlich gebildeten Goethit handelt, da dieser die Fähigkeit besitzt sich kugelförmig auszubilden.

# 6

# Verzeichnisse

## 6.1 Literaturverzeichnis

AMT DER KÄRNTNER LANDESREGIERUNG, Abteilung 15 – Umweltschutz und Technik (1999): Bodenzustandsinventur Kärnten; 217 S, Klagenfurt.

BIERMANN, G., DIEBER, K., GLANZER, O., KÖSTLER, H. J., MEIXNER, H., PICCOTTINI, G., WEISZ, A., UCIK, F. H. (1981): 2500 Jahre Eisen in Hüttenberg; Verlag des Landesmuseums für Kärnten, 170 S, Klagenfurt.

BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN (Hrsg.). Austrian Map, Version 1.0, 1999.

CLAR, E. & MEIXNER, H. (1953): Die Eisenspatlagerstätte von Hüttenberg und ihre Umgebung. Aus: Lagerstättenuntersuchung der Österr.- Alpine Montangesellschaft; Carinthia II, 143., 67-92, Klagenfurt.

DEARING, J. A., HAY, K. L., BABAN, S. M. J., HUDDLESTONE, A. S., WELLINGTON, E. M. H., LOVELAND, P. J. (1996): Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set; Geophys. J. Int 127, 728-734.

EBNER, F. (1997): Die geologischen Einheiten Österreichs und ihre Rohstoffe; in: WEBER, L. (1997): Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs; Geologische Bundesanstalt, Archiv für Lagerstättenforschung, 17, 608 S., Wien.

EVANS, M. (2003): Environmental Magnetism; Elsevier Science, 289 S., USA.

FIALOVÁ, H., MAIER, G., PETROVSKÝ, E., KAPITCKA, A., BOYKO, T., SCHOLGER, R. (2005): Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings; Journal of Applied Geophysics, 59, 273-283.

FLANDERS, P. J. (1994): Collection, measurement and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment; J. Appl. Phys. 75, 5931-5936.

FLANDERS, P. J. (1999): Identifying fly ash at the distance of fossil fuel power stations; Environ. Sci. Technol. 33, 528-532.

FUCHS, H. W. (1978): Korngefügekundliche Untersuchungen der Sideritlagerstätte Hüttenberg, Kärnten; Diss. Univ. Innsbruck, 161 S., Innsbruck.

FUCHS, H. W. (1980): Korngefügeanalytische Untersuchungen der Siderit-Lagerstätte Hüttenberg (Kärnten); TMPM, 27, 233-260, Wien.

- GAO, S., LUO, T. C., ZHANG, B. R., ZHANG, H. F., HAN, Y. W., ZHAO, Z. D. and HU, Y. K. (1998): Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1,959-1,975.
- HABLER, G. & THÖNI, M., (2001): Preservation of Permo-Triassic low pressure assemblages in the Cretaceous high pressure metamorphic Saualpe crystalline basement (Eastern Alps, Austria); – *Journal metamorphic Geol.* 19, 679-697.
- HANESCH, M., SCHOLGER, R. (2002): Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements; *Environ. Geol.* 42, 852-870.
- HANESCH, M., SCHOLGER, R. (2005): The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles; *Geophys Journal Int*, 6-50, 161.
- HEMETSBERGER, S. (2002): Untersuchung der magnetischen Suszeptibilitätsanomalie entlang der steirischen Eisenstrasse; Diplomarbeit Universität Leoben, 80 S., Leoben.
- HEMETSBERGER, S., SCHOLGER, R. (2005): Umweltmagnetik im Raum Trofaiach bis Eisenerz (steirische Eisenstrasse); *Mitt. Naturwiss. Ver. Stmk., Band 135*, 13-24, Graz.
- HOFFMANN, G., KNAB, M., APPEL, E. (1999): Magnetic susceptibility mapping of road side pollution; *L. Geochem. Expl.* 66, 313-326.
- KAPICKA, A., PETROVSKÝ, E., USTJAK, U., MACHÁCKOVÁ, K. (1999): Proxy mapping of fly ash pollution of soils around a coal-burning power plant, a case study in the Czech Republic; *J. Geochem. Int*, 66, 291-297.
- KAPICKA, A., PETROVSKÝ, E., JORDANOVA, N., PODRÁZSKÝ, V. (2001): Magnetic parameters of forest top soils in Krkonose Mountains. Czech Republic; *Phy. Chem. Earth.* 26, 917-922.
- KAPICKA, A., PETROVSKÝ, E., JORDANOVA, N., PODRÁZSKÝ, V. (2001): Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes; *J. Appl. Geophys.* 48, 93-102.
- KAPICKA, A., PETROVSKÝ, E., JORDANOVA, N., PODRÁZSKÝ, V. (2003): Magnetic study of weakly contaminated forest soils; *Water, Air and Soil Pollution* 148, 31-44.
- KURZ, W., FRITZ, H. (2003): Tectonometamorphic evolution of the Austroalpine Nappe Complex in the Central Eastern Alps. Consequences for the Eo-Alpine evolution off he Eastern Alps; *International Geology Review*, 45, 1100-1127.

LECOANET, H., LÉVÉQUE, F., SEGURA, S. (1999): Magnetic susceptibility in environmental applications: comparison of field probes; *Phys. Earth. Planet. Inter.* 115, 191-204.

MAGIERA, T., STRZYSZCZ, Z. (2000): Ferrimagnetic minerals of anthropogenic origin in soils of some polish national parks; *Water, Air and Soil Pollution* 124, 37-48.

MAHER, B. A., THOMPSON, R., HOUNSLOW, M. W. (1999): Introduction. In: MAHER, B. A., THOMPSON, R.: *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*, Chap. 1, Cambridge University Press, 1-48, 335.

MAIER, G. (2002): *Magnetische Charakterisierung von geogen und/oder anthropogen dominierten Böden: Beispiel Breitenau-Hochlantsch*; Diplomarbeit Universität Leoben, 107 S., Leoben.

MATZKA, J., MAHER, B. (1999): Magnetic Biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates; *Atmospheric Environment* 33, 4563-4569.

MEIXNER, H. (1953): Kahlerit, ein neues Mineral der Uranglimmergruppe, aus der Hüttenberger Lagerstätte, Kärnten; *der Karinthin*, 23., 277-280.

MEIXNER, H. (1975): Minerale und Lagerstätten im Bereich der Saualpe, Kärnten; *Clausth.geol.Abh., Sb.*, 199-217.

MILLER, C., THÖNI, M. (1997): Eo-Alpine eclogitisation of Permian MORB-typ gabbros in the Koralpe (Eastern Alps): new geochronological, geochemical and petrological data; *Chemical Geology*, 137, Issues 3-4, 283-310.

NÈEL, L. (1948): Magnetic properties of ferrites: ferrimagnetism and antiferromagnetism; *Ann. Phys.*, 3, 137-198.

NEUBAUER, F. R. (1979): Die Gliederung des Altpaläozoikums südlich und westlich von Murau (Steiermark/Kärnten); *Jahrbuch Geologische Bundesanstalt*, 122, 455-511.

NEUBAUER, F., (1987): The Gurktal thrust system within the Austroalpine region. Some structural aspects. In: Flügel, H. W. und Faupl, P. (eds.): *Geodynamics of the Eastern Alps*, 223-236, Deuticke, Wien.

NEUBAUER, F. (1989): A plutonic source for pegmatites in the Austroalpine basement of the Gleinalm region (Eastern Alps); *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, 615-624.

NEUBAUER, F. (1992): The Gurktal Nappe Complex; *ALCAPA Field Guide*, 71-82, Graz.

PETROVSKÝ, E., ELLWOOD, B. B. (1999): Magnetic monitoring of pollution of air, land and waters. In MAHER, B. A. and THOMPSON, R. (Eds): *Quaternary Climates, Environment and Magnetism*, Cambridge Univ. Press, UK, 279-322.

PISTOTNIK, J., WEISSENBACH, N. (2000): Blatt 187 - Bad Sankt Leonhard im Lavanttal 1:50.000.

PROHASKA, W. (2003): Die Geologisch-Lagerstättenkundliche Stellung der Hüttenberger Vererzungen. In: CECH, B. (2003-2005): *Die Produktion von Ferrum Noricum am Hüttenberger Erzberg*, 7-15, 293, Wien.

PUTZ, M., STÜWE, K., JESSELL, M., CALCAGNO, P. (2005): Three-dimensional model and late stage warping of the Plattengneis Shear Zone in the Eastern Alps; *Tectonophysics* 412, 87-103.

PÜSCHEL, R. (1965): Anwendung der Röntgenfluoreszenz in der Spurenanalyse; *Microchimica Acta*, 53, 4, 770- 786.

SCHMID, S. M., FÜGENSSCHUH, B., KISSLING, E., SCHUSTER, R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the alpine orogen; *Eclogae geol. Helv.* 97, 93-117.

SCHOLGER, R., HANESCH, M. (2000): Einsatz geophysikalischer Messmethoden als ökonomische Indikatoren für geogene und anthropogene Schwermetallanreicherung in Böden der Steiermark: Endbericht 2000 Bund/Bundesländer-Kooperation; Projekt StU97. 42, Land Steiermark.

SCHULZ, O., SCHROLL, E. (1997): Sideritbezirk Hüttenberg; in: WEBER, L. (1997): *Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs*; Geologische Bundesanstalt, Archiv für Lagerstättenforschung, 17, 608 S., Wien.

SCHULZ, O., SCHROLL, E., DIEBER, K. & FUCHS, H. W. (1986): Zur Frage der Sideritgenese der Lagerstätten um Hüttenberg (Kärnten); *Carinthia II*, 176/96, 479-512, Klagenfurt.

SEELIGER, E., MÜCKE, A. (1974): Kosmischer Staub oder irdischer Verbrennungsfunken?; *Chemie der Erde*, 33, 1, 1-30.

SOFFEL, Chr. (1999): *Paläomagnetismus und Archäomagnetismus*; Springer Verlag, 276 S., Berlin – Heidelberg – New York.

TENCZER, V., STÜWE, K. (2003): The metamorphic field gradient in the eclogite type locality, Koralpe region, Eastern Alps; *Journal of Metamorphic Geology*, 21, 377-393.

THIEDIG, F., VAN HUSEN, D. PISTOTNIK, J. (1999): Blatt 186 – Sankt Veit an der Glan 1:50000.

TIPLER, P.A. (1995): Physik; Spektrum Akad. Verl., 1522 S., Heidelberg.

TIPLER, P.A. (2004): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure; Spektrum Akad. Verl., 1388 S., Heidelberg.

THOMPSON, R., OLDFIELD, F. (1986): Environmental Magnetism; 227 S., London.

THÖNI, M., MILLER, C. (1996): Garnet Sm-Nd data from the Saualpe and the Koralpe ( Eastern Alps, Austria): chronological and p-t constraints on the thermal and tectonic history; Journal of Metamorphic Geology, 14, Issue 4, 453-466.

THÖNI, M. (2002): Sm-Nd isotope systematics in garnet from different lithologies (Eastern Alps): age results, and an evaluation of potential problems for garnet Sm-Nd chronometrie; chemical geologie 185, 255-281.

TOLLMANN, A. (1977): Geologie von Österreich, Bd.I: Die Zentralalpen; Deuticke, 766 S., Wien.

VEROSUB, K.L. und ROBERTS, A.P. (1995): Environmental Magnetism: Past, Present, and Future.; Journal of Geophysical Research 100 (B2), 2175-2192.

Von GOSEN, W., HAIGES, K.H., NEUBAUER, F., PISTOTNIK, J., THIEDIG, F. (1985): Die tektonischen Baueinheiten am Nord- und Westrand der Gurktaler Decke (Österreich); Jahrbuch Geologische Bundes Anstalt, 27/4, 693-699.

WEISZ, A. (1981): Zur Geschichte des Bergbaues von Hüttenberg. – In: BIERMANN, G. et al.(1981): 2500 Jahre Eisen aus Hüttenberg, 170,Verlag des Landesmuseums in Kärnten, Klagenfurt.

#### **Verwendete Internetseiten:**

[www.dgg-online.de/mitteilungen/sonderhefte/bleil.pdf](http://www.dgg-online.de/mitteilungen/sonderhefte/bleil.pdf)

<http://www.humax.ch/produkte/handsondensch/index.php>

<http://www.bartington.com/templates/asset-relay.cfm?frmAssetFileID=159>

<http://www.geocities.com/capecanaveral/launchpad/1008/mikrosonde.html>

<http://www.uni-koeln.de/math-nat-fak/mineral/museum/5-Sonde.pdf>

<http://www.raman.de/htmlDE/home/startDe.html>

<http://www.raman.de/htmlDE/basics/basicDe.html>

<http://rruff.info/goethite/names/asc/X050091>

<http://rruff.info/goethite/names/asc/X050093>

[http://de.encarta.msn.com/encyclopedia\\_761559225/Stahl.html](http://de.encarta.msn.com/encyclopedia_761559225/Stahl.html)

## 6.2 Abbildungsverzeichnis:

**Abbildung 1:** Geographische Lage des Arbeitsgebietes im Raum Hüttenberg, (AUSTRIAN MAP 1.0 – ÖK 186/187).

**Abbildung 2:** Großtektonischen Überblick des Ostalpins nach THÖNI (2002) – SI = Silvretta, ÖTZ = Ötztal; SAU = Saualpe; KOR = Koralpe; PO = Bacherengebirge (Slowenien); GN = Gurktaler Decke; TW = Tauern Fenster; EF = Engadiner Fenster; RW = Rechnitzer Fenster und PAL = Periadriatische Naht.

**Abbildung 3:** Das Görtschitztaler Bruchsystem am Westrand der Saualpe nach E. Clar et al. (1963). Die Zahlen in den Kreisen geben die Versatzbeträge in Kilometern an. (aus Tollmann, 1977).

**Abbildung 4:** Geologische Karte des Gebiets Hüttenberg (nach Thiedig et al., 1999). Blatt 186 St.Veit.

**Abbildung 5:** Geologische Karte des Gebiets Hüttenberg (Pistotnik et al., 2000). Blatt 187 Bad St. Leonhard.

**Abbildung 6:** Lage der Kor- und Saualpe im Koralpen-Wölzer Deckensystem (aus Putz et al., 2006).

**Abbildung 7:** Tektonische Gliederung des Gurktaler Deckensystems (aus Neubauer, 1987).

**Abbildung 8:** Ordnungszustände im Magnetismus; Pfeile: magnetische Momente. a Paramagnetismus (völlige Unordnung); b Antiferromagnetismus (strenge Ordnung, aber kein resultierendes Moment); c Ferrimagnetismus (strenge Ordnung mit einem resultierenden Restmoment); d Ferromagnetismus (strenge Ordnung mit einem resultierenden Moment) (aus Soffel, 1991).

**Abbildung 9:** Schematische Darstellung Weiß'scher Bezirke. Innerhalb jedes einzelnen Bezirks sind die magnetischen Momente ausgerichtet, aber die Richtung ist von Bezirk zu Bezirk verschieden. Das resultierende magnetische Moment ist folglich null. Bereits ein schwaches äußeres Magnetfeld kann eine Vergrößerung der Bezirke bewirken, in denen die Momente parallel zum Feld ausgerichtet sind, oder zur Drehung der Orientierungsrichtung einzelner Bezirke führen. In beiden Fällen ist das resultierende magnetische Moment dann von null verschieden und parallel zum Feld gerichtet (aus Tipler, 2004).

**Abbildung 10:** Hystereseschleife und Definition magnetischer Kenngrößen. Idealierte Hystereseschleife;  $J$  Magnetisierung;  $H_a$  äußeres Magnetfeld;  $J_s$  Sättigungsmagnetisierung;  $J_r$  remanente Magnetisierung;  $H_c$  Koerzitivkraft oder Koerzitivfeldstärke;  $H_{cr}$  Remanenzkoerzitivkraft; NK Neukurve; Rayleighschleife an einem Punkt der Neukurve. Die Suszeptibilität  $k$  ist das Verhältnis  $J/H$ , die Anfangsuszeptibilität ist die Suszeptibilität bei Beginn der Neukurve (Soffel, 1991).

**Abbildung 11:** Feldmessung mit dem Bartington MS2D-Sensor.

**Abbildung 12:** Bartington MS2B Sensor.

**Abbildung 13:** HUMAX Schlagsonde mit einem Durchmesser von 35mm (aus <http://www.humax.ch/produkte/handsondensch/ind>).

**Abbildung 14:** Bodenprofil HP7.

**Abbildung 15:** Bartington MS2C Sensor (aus Bartington Operation Manual).

**Abbildung 16:** Durchmesserkorrektur (aus Bartington Operating Manual).

**Abbildung 17:** End of Core Effekt, gültig für Bartington MS2C Sensor (aus Hemetsberger, 2002).

**Abbildung 18:** Unterteilung der Bodenproben in 3 bis 4 Tiefenstufen.

**Abbildung 19:** Bodenprobe HP7 in einer Plastikhülle.

**Abbildung 20:** Bodenprobe ohne Hülle.

**Abbildung 21:** Zerteilung der Bodenprobe entsprechend der Änderung der Suszeptibilität mit der Tiefe.

**Abbildung 22:** Schematische Aufbau einer Elektronenstrahlmikrosonde (<http://www.unikoeln.de/math-nat-fak/mineral/museum/5-Sonde.pdf>).

**Abbildung 23:** Ramanspektrum eines Goethites (<http://rruff.info/goethite/names/asc/X050091>).

**Abbildung 24:** Darstellung der Arten von Streuung bei der Ramanspektroskopie (<http://www.raman.de/htmlDE/basics/basicDe.html>).

**Abbildung 25:** Curiepunktbestimmung; graphische Auswertung,  $T_C = 590^\circ\text{C}$  (aus Hemetsberger 2002).

**Abbildung 26:** Curiepunktbestimmung nach physikalischer Definition; 1 Heizkurve; 2  $k = C / (T - T_C)$ ,  $T_C$  zu niedrig gewählt; 3  $k = C / (T - T_C)$ ,  $T_C$  richtig gewählt; 4  $k = C / (T - T_C)$ ,  $T_C$  zu hoch gewählt;  $T_C = 580^\circ\text{C}$  (aus Hemetsberger 2002).

**Abbildung 27:** Verteilungskarte der magnetischen Suszeptibilität im Arbeitsgebiet. Klasseneinteilung nach Hemetsberger 2002.

**Abbildung 28:** Massensuszeptibilität über die Frequenzabhängigkeit.

**Abbildung 29:** Massensuszeptibilität, Frequenzabhängigkeit und in situ Werte (Volumensuszeptibilität).

**Abbildung 30:** Diagramm nach Thompson & Oldfield. Probenpunkte aus dem südl. Teil des Arbeitsgebietes; Kreuzung Görtschitztal – Löllinggraben.

**Abbildung 31:** Diagramm nach Thompson & Oldfield. Probenpunkte am Großkoll und Andreaskreuz.

**Abbildung 32:** Diagramm nach Thompson & Oldfield. Probenpunkte aus Lölling, Löllinggraben, Hausmann, Heft, Mosinz, Jouschitzen, Hüttenberg, Untergossen, Plankogel, Knappenberg, Semlach und Obersemloch.

**Abbildung 33:** Gegenüberstellung von Massenssuszeptibilität und Seehöhe.

**Abbildung 34:** Tiefenverteilung der Volumenssuszeptibilität der Bodenproben HP1 bis HP17.

**Abbildung 35:** Darstellung der CaO-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 36:** Darstellung der Strontium-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 37:** Darstellung der Strontiumwerte in den Bachsedimenten aus der Metallogenetischen Karte Österreich (Weber, 1999).

**Abbildung 38:** Darstellung der As-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 39:** Darstellung der Co-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 40:** Darstellung der Cr-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 41:** Darstellung der Ni-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 42:** Darstellung der Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 43:** Darstellung der TiO<sub>2</sub>-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 44:** Darstellung der Mn-Gehalte in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 45:** Darstellung der Suszeptibilitätsverteilung in den Proben HP1 bis HP17.

**Abbildung 46:** Röntgendiffraktogramme der Probe HP6\_2.

**Abbildung 47:** Röntgendiffraktogramme der Probe KE5.

**Abbildung 48:** Mikrosondenaufnahme einer großen Kugel aus Probe HP1 bestehend aus Eisen.

**Abbildung 49:** Mikrosondenaufnahme der Probe HP1. Kugelige Komponente bestehend aus Eisen und Spuren von Mangan.

**Abbildung 50:** Mikrosondenaufnahme der zementierten Hauptbestandteile.

**Abbildung 51:** Magnetitkristall aus Probe HP1, ca. 100  $\mu\text{m}$  groß.

**Abbildung 52:** Magnetitkristall aus Probe HP4, ca. 40  $\mu\text{m}$  groß.

**Abbildung 53:** Magnetitkristall aus Probe HP4, ca. 100  $\mu\text{m}$  groß.

**Abbildung 54:** Kugelige Komponente aus Probe HP7, ca. 20  $\mu\text{m}$  groß.

**Abbildung 55:** Kugelige Komponente aus Probe HP7, ca. 40  $\mu\text{m}$  groß.

**Abbildung 56:** Kugelige Komponente aus Probe HP8, ca. 10  $\mu\text{m}$  groß.

**Abbildung 57:** Kugelige Komponente aus HP10, ca. 40  $\mu\text{m}$  groß.

**Abbildung 58:** Metallisches Silizium aus Probe HP7.

**Abbildung 59:** Anwachssaum von kleinen Fe- Kugeln.

**Abbildung 60:** Ergebnis der quantitativen Abschätzung von kugeligen Komponenten.

**Abbildung 61:** Ramanspektren von 2 der kugeligen Komponenten. Ihr Spektrum ist dem des Goethits sehr ähnlich.

**Abbildung 62:** Ramanspektrum eines Goethit aus <http://rruff.info/goethite/names/asc/X050093>.

**Abbildung 63:** Curiepunkt-Bestimmung an Bodenprobe HP4. Gesamtdarstellung der Thermomagnetischen Kurve.

**Abbildung 64:** Curiepunkt-Bestimmung an Bodenprobe HP9. Gesamtdarstellung der Thermomagnetischen Kurve.

**Abbildung 65:** Curiepunkt-Bestimmung an Bodenprobe HP10. Gesamtdarstellung der Thermomagnetischen Kurve.

### 6.3 Tabellenverzeichnis:

**Tabelle 1:** Spezifische Suszeptibilität einiger diamagnetischer Minerale (in  $10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ ) (aus Soffel, 1991).

**Tabelle 2:** Spezifische Suszeptibilität einiger paramagnetischer Minerale bei Normaltemperatur (in  $10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ ) (aus Soffel, 1991).

**Tabelle 3:** Einige magnetische Parameter von antiferromagnetischen Mineralien. Die Werte für die spezifische Suszeptibilität bei Normaltemperatur können erheblich variieren und sind in Einheiten  $10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$  angegeben. (aus Soffel, 1991).

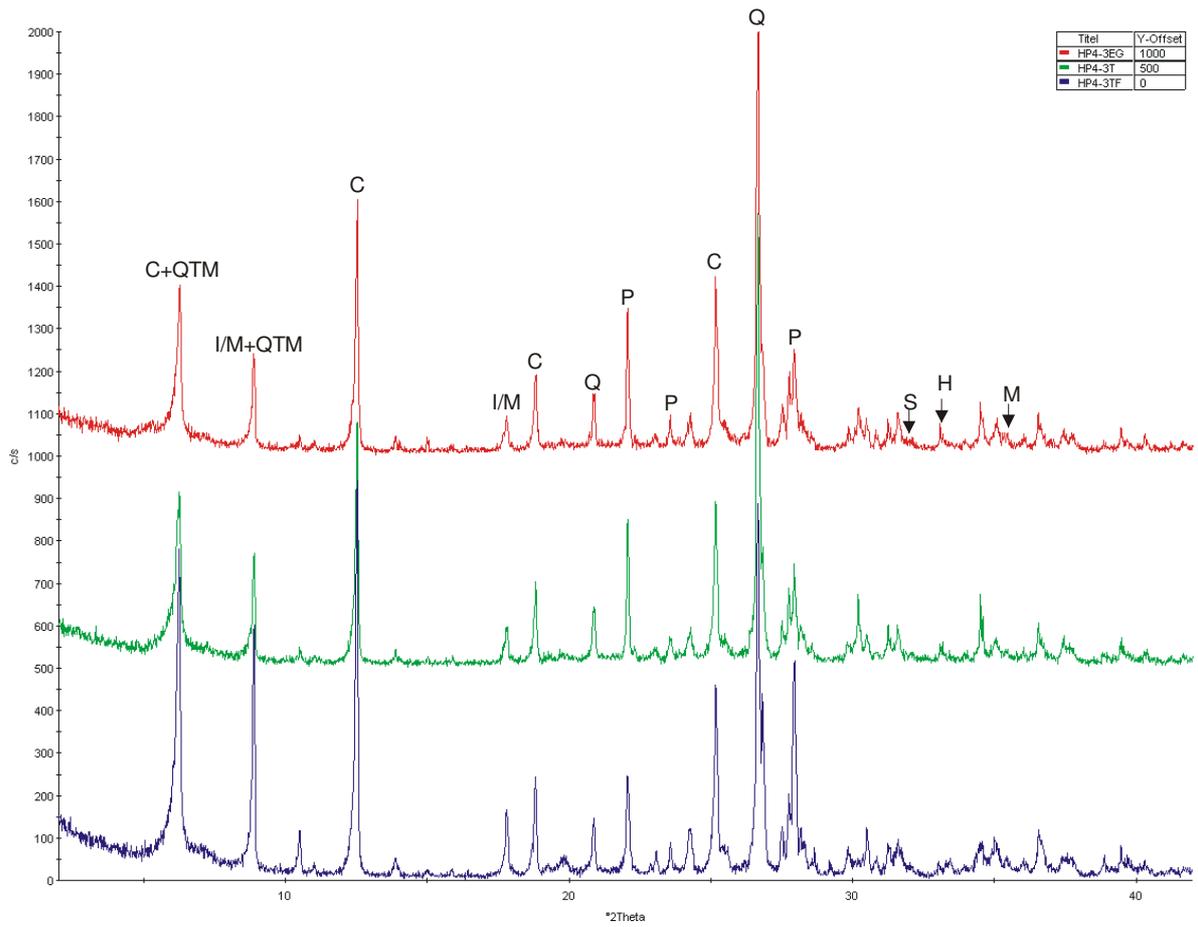
**Tabelle 4:** Einige magnetische Eigenschaften der wichtigsten natürlichen Ferrite. Die Werte für die spezifische Suszeptibilität können erheblich variieren und sind in Einheiten  $10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$  angegeben (nach Soffel 1991).

**Tabelle 5:** Normierungsfaktoren für den End of Core Effekt (aus Hemetsberger, 2002).

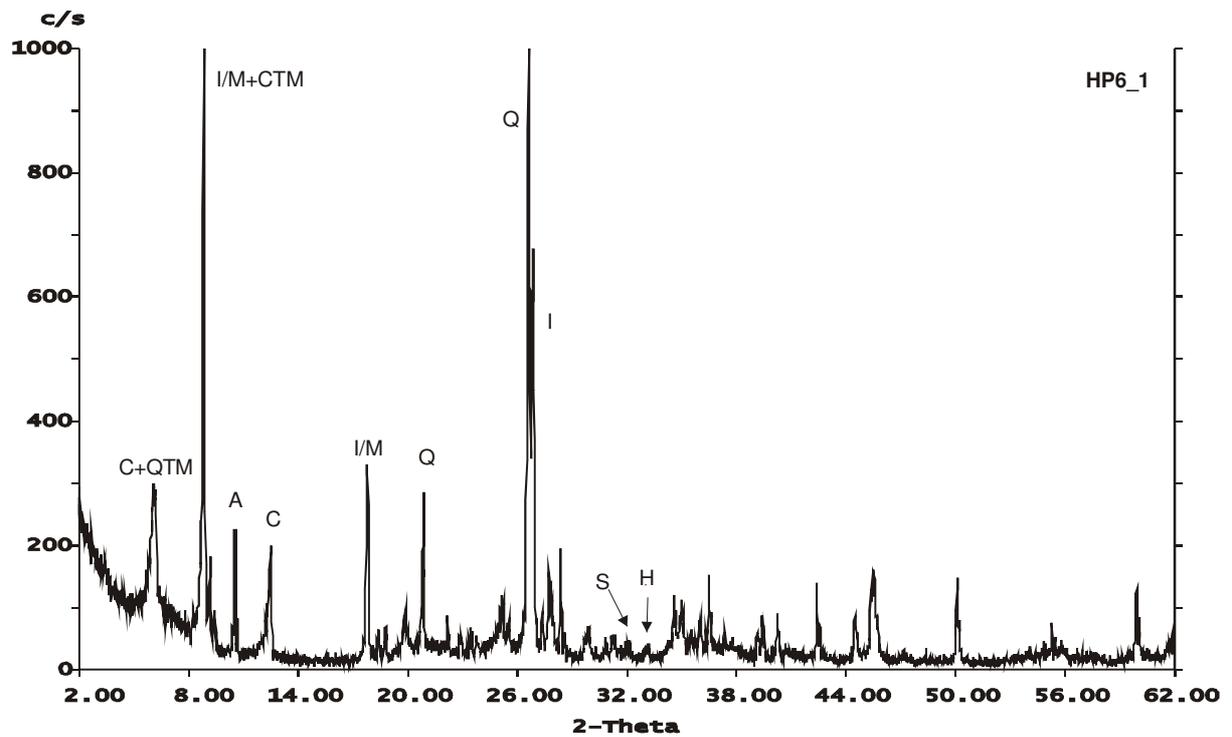
**Tabelle 6:** Chemische Analyse.

**Tabelle 7:** Abkürzungen der Minerale in den Röntgendiffraktogrammen.

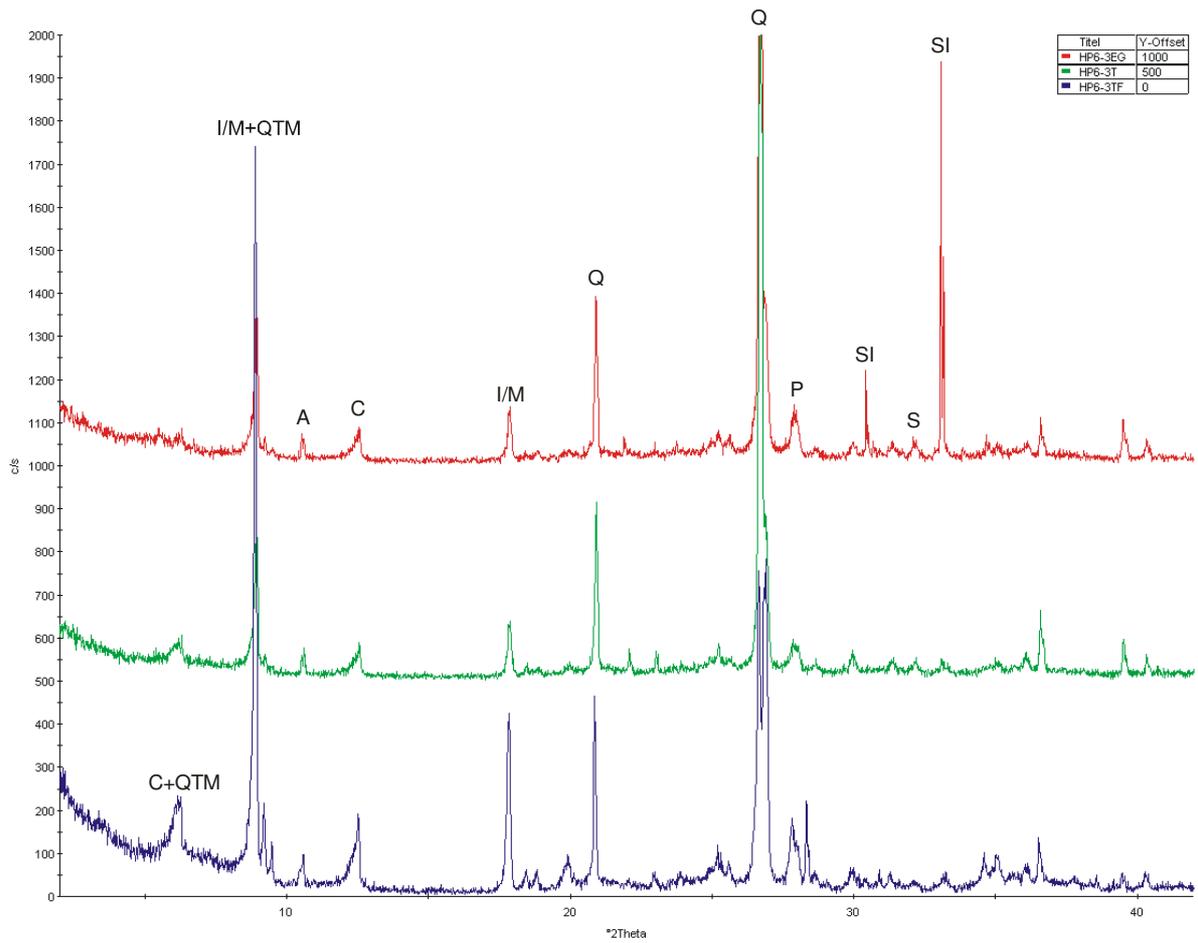
# Anhang



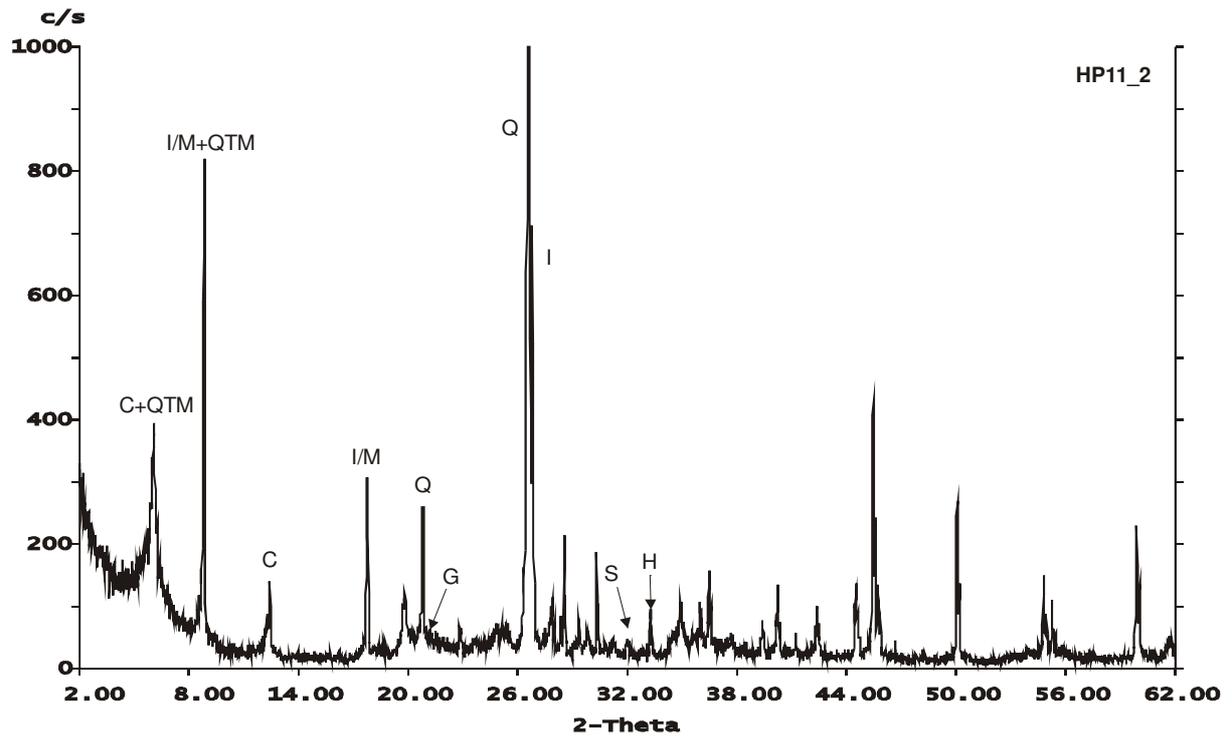
Röntgendiffraktogramme der Bodenprobe HP4\_3.



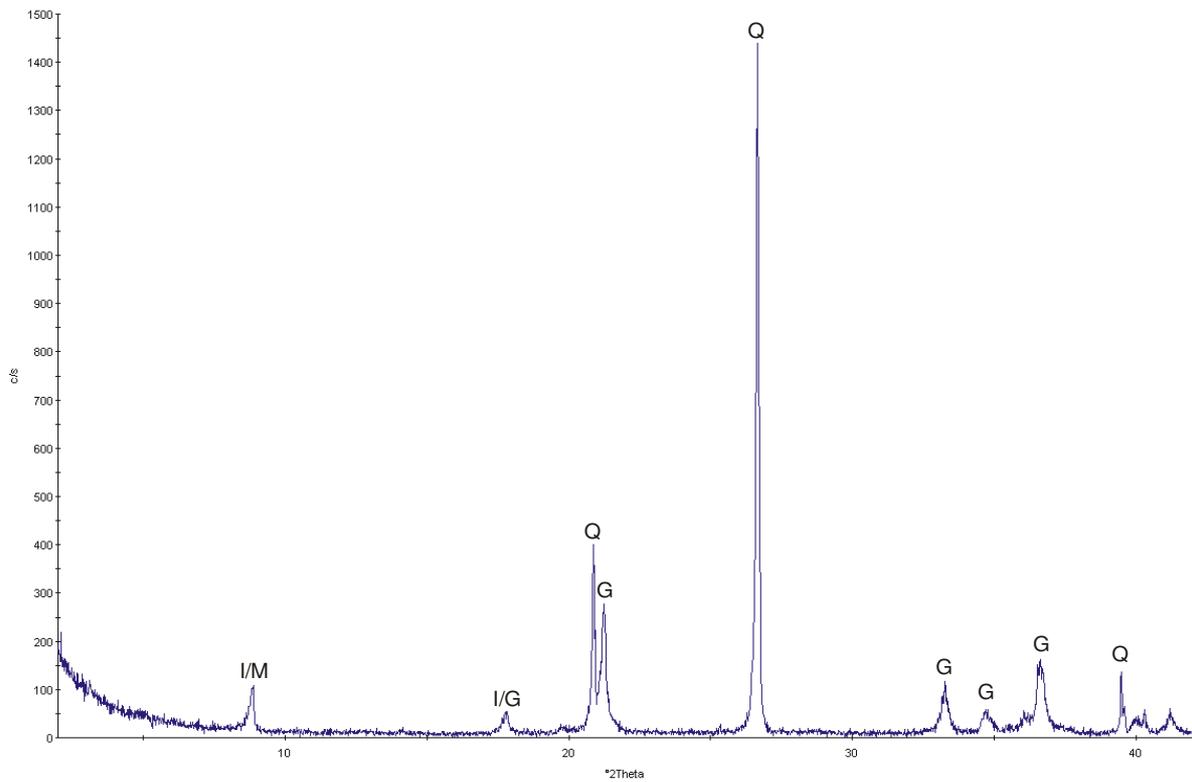
Röntgendiffraktogramm der Bodenprobe HP6\_1.



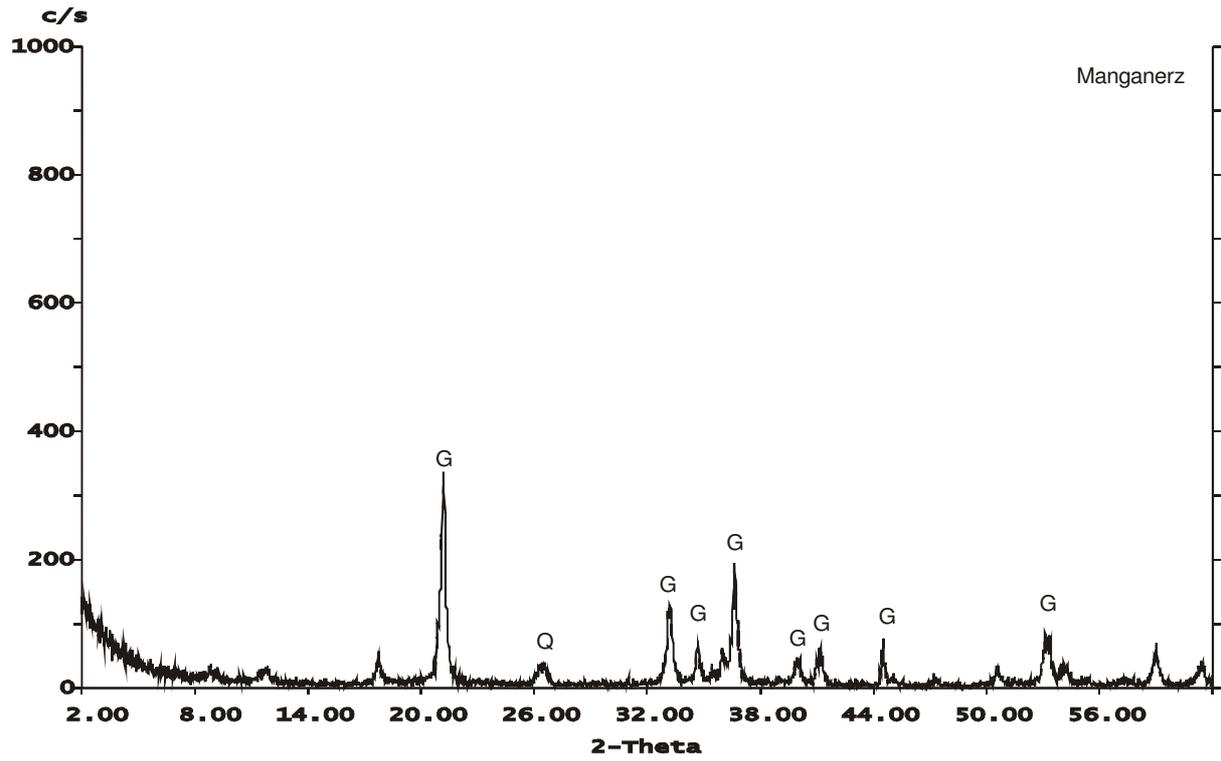
Röntgendiffrakrogramme der Bodenprobe HP6\_3.



Röntgendiffraktogramm der Bodenprobe HP11\_2.



Röntgendiffraktogramm der Erzprobe KE1.



Röntgendiffraktogramm der Erzprobe Manganerz.